

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号  
特開2001-249313  
(P2001-249313A)

(43)公開日 平成13年9月14日 (2001.9.14)

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>  
G 0 2 F 1/09

識別記号  
5 0 5

F I  
G 0 2 F 1/09

テマコード<sup>\*</sup>(参考)  
5 0 5 2 H 0 7 9

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 18 頁)

(21)出願番号 特願2000-58815(P2000-58815)

(22)出願日 平成12年3月3日(2000.3.3)

(71)出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号

(72)発明者 池田 誠一

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号 富士通株式会社内

(72)発明者 福島 幡洋

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号 富士通株式会社内

(74)代理人 100078330

弁理士 笹島 富二雄

最終頁に続く

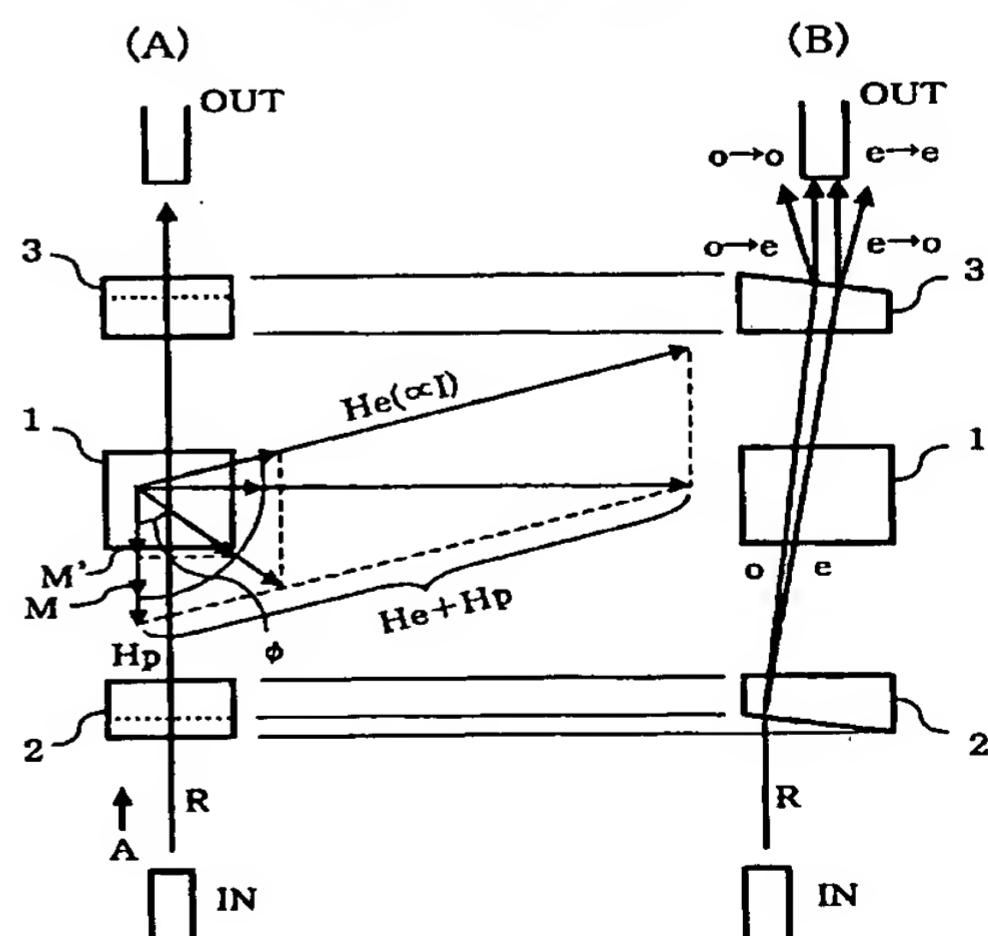
(54)【発明の名称】 ファラデー効果を利用した可変光減衰器

(57)【要約】

【課題】 ファラデー回転角の波長依存性を考慮して磁気光学系の最適化を行い、デバイス全体での波長依存性の低減を図った可変光減衰器を提供する。

【解決手段】 本発明による可変光減衰器は、可変のファラデー回転角を与えるファラデー回転子1と、ファラデー回転子1の前後に配置された偏光子2および検光子3と、を備え、光減衰量の波長依存性が最大になるときのファラデー回転角が略0°となるように、偏光子2の光学軸に対する検光子3の光学軸のなす角度を設定することで、上記ファラデー回転角での光減衰量の波長依存性を低減させたものである。

本実施形態の可変光減衰器



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】透過する偏光に対して可変のファラデー回転角を与えるファラデー回転子と、該ファラデー回転子の前後の光線軸上にそれぞれ配置された直線偏光を切り出す素子と、を備え、前記ファラデー回転角の変化に伴って光減衰量が変化する可変光減衰器であって、光減衰量の波長依存性が最大になるときのファラデー回転角が略0°となるように、前記直線偏光を切り出す素子のうちの一方の素子の光学軸に対する他方の素子の光学軸のなす角度を設定することを特徴とするファラデー効果を利用した可変光減衰器。

【請求項2】請求項1に記載の可変光減衰器であって、互いに方向の異なる固定磁場および可変磁場を前記ファラデー回転子に与える磁場発生手段を備え、前記固定磁場および前記可変磁場で形成される合成磁場の方向が光線方向に直交する状態を含むように、前記固定磁場および前記可変磁場の各方向を設定することで、ファラデー回転角を0°に設定可能にしたことを特徴とするファラデー効果を利用した可変光減衰器。

【請求項3】請求項2に記載の可変光減衰器であって、前記固定磁場の方向が、光線方向と平行であるとき、前記可変磁場の方向が、前記固定磁場の方向に対して鈍角をなすことを特徴とするファラデー効果を利用した可変光減衰器。

【請求項4】請求項2に記載の可変光減衰器であって、前記固定磁場の方向が、光線方向とは平行でないとき、前記可変磁場の方向が、前記固定磁場の光線方向成分に対して鈍角をなすことを特徴とするファラデー効果を利用した可変光減衰器。

【請求項5】偏光を切り出す2つの偏光素子と、該偏光素子の間に設けたファラデー回転子と、該ファラデー回転子を通過する光の軸と同じ軸に平行に磁場を加える第1磁石と、該第1磁石の磁場の方向に対して磁場の方向が鈍角となるように配置した第2磁石とを設け、該第2磁石は、磁場の強さを調整することができることを特徴とするファラデー効果を利用した可変光減衰器。

【請求項6】請求項5に記載の可変光減衰器であって、前記第2磁石の磁場の強さを調整することで、前記第1磁石の磁場と前記第2磁石の磁場との合成磁場の方向が、前記光の軸に対して垂直となる位置を取ることができるようにしたことを特徴とするファラデー効果を利用した可変光減衰器。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、ファラデー効果を利用して可変の光学特性を得る光減衰器に関し、特に、光学特性の波長依存性を低減させた可変光減衰器およびそれを用いた光伝送システムに関する。

## 【0002】

10

【従来の技術】磁気光学効果の1つであるファラデー効果を利用した可変光減衰器は、光伝送システム等の構成要素として広く用いられている。例えば、ファラデー効果を用いた可変光減衰器等は、光増幅器を有するシステムなどにおいて、光増幅器の出力レベルを一定に維持するために用いられている。このような可変光減衰器は、一般に、電磁石への印加電流等を変化させることによってファラデー回転子の回転角が変化し、該回転角の設定に応じて光減衰量が決まるものであって、機械的可動部分を持たない構成になることが1つの特徴である。

10

【0003】従来のファラデー効果を利用した可変光減衰器の具体的な構成としては、例えば、特開昭61-35428号公報、特開平6-51255号公報等に記載されたものがある。

## 【0004】

20

【発明が解決しようとする課題】ところで、上記のような従来の可変光減衰器に適用されるファラデー回転子は、ファラデー回転角に応じた波長依存性を物的に有している。また、特開平6-51255号公報に記載された従来の可変光減衰器などのように、直交する固定磁場および可変磁場で形成される合成磁場によりファラデー回転角を可変制御する構成では、その光減衰量についてある程度の波長依存性が生じることも知られている。このため、従来の可変光減衰器では、ファラデー回転角および光減衰特性のそれぞれの波長依存性によって、出力光のレベルが波長に応じて異なるようになってしまふ。このような従来の可変光減衰器を用いて、例えば波長多重(WDM)光伝送システム等を構築したとすれば、波長チャンネルごとに光レベルが相違てしまい、伝送路上での非線形効果を誘発するなどの原因となるため好ましくない。

30

【0005】本発明は上記の点に着目してなされたもので、ファラデー回転角の波長依存性を考慮して磁気光学系の最適化を行い、デバイス全体での波長依存性の低減を図った可変光減衰器およびそれを用いた光伝送システムを提供することを目的とする。

## 【0006】

40

【課題を解決するための手段】上記の目的を達成するため、本発明によるファラデー効果を利用した可変光減衰器の1つの態様は、透過する偏光に対して可変のファラデー回転角を与えるファラデー回転子と、該ファラデー回転子の前後の光線軸上にそれぞれ配置された直線偏光を切り出す素子と、を備え、ファラデー回転角の変化に伴って光減衰量が変化する可変光減衰器であって、光減衰量の波長依存性が最大になるときのファラデー回転角が略0°となるように、前記直線偏光を切り出す素子のうちの一方の素子の光学軸に対する他方の素子の光学軸のなす角度を設定するものである。

50

【0007】かかる構成では、可変光減衰器の光減衰量について、その波長依存性が最大になるときのファラデー

一回転角に着目し、ファラデー回転角が小さなとき程その波長依存性が低減されるという傾向を考慮して、光減衰量の波長依存性が最大になるファラデー回転角が略0°となるように、直線偏光を切り出す素子のうちの一方の素子の光学軸に対する他方の素子の光学軸のなす角度が設定される。これにより、略0°にされたファラデー回転角における光減衰量の波長依存性が低減されるようになる。

【0008】上記の可変光減衰器については、互いに方向の異なる固定磁場および可変磁場をファラデー回転子に与える磁場発生手段を備え、固定磁場および可変磁場で形成される合成磁場の方向が光線方向に直交する状態を含むように、固定磁場および可変磁場の各方向を設定することで、ファラデー回転角を0°に設定可能にするのが好ましい。具体的には、固定磁場の方向が、光線方向と平行であるとき、可変磁場の方向が、固定磁場の方向に対して鈍角をなすようにすればよい。或いは、固定磁場の方向が、光線方向とは平行でないとき、可変磁場の方向が、固定磁場の光線方向成分に対して鈍角をなすようにしても構わない。

【0009】かかる構成によれば、固定磁場および可変磁場で形成される合成磁場の方向が光線方向に直交する状態のときに、ファラデー回転子の磁化の光線方向成分が零となるため、ファラデー回転角=0°が実現されるようになる。

【0010】本発明によるファラデー効果を利用した可変光減衰器の他の態様は、偏光を切り出す2つの偏光素子と、該偏光素子の間に設けたファラデー回転子と、該ファラデー回転子を通過する光の軸と同じ軸に平行に磁場を加える第1磁石と、該第1磁石の磁場の方向に対して磁場の方向が鈍角となるように配置した第2磁石とを設け、該第2磁石は、磁場の強さを調整することができるようとしたものである。また、上記可変光減衰器については、第2磁石の磁場の強さを調整することで、第1磁石の磁場と第2磁石の磁場との合成磁場の方向が、光の軸に対して垂直となる位置を取ることができるようとしてもよい。

#### 【0011】

【発明の実施の形態】まず、ファラデー効果を利用した一般的な可変光減衰器の基本構成および動作原理について簡単に説明する。

【0012】図1は、一般的な可変光減衰器の磁気光学系を示す図であって、(A)は上面図、(B)は側面図である。なお、図1(B)には、光線追跡を行った結果も示してある。

【0013】図1に示すように、一般的な可変光減衰器では、入射される光の光線方向に沿って、直線偏光を切り出す素子である偏光子2、ファラデー回転子1、直線偏光を切り出す検光子3が順に配置される。また、ファラデー回転子1には、図1(A)に示すように、光線方

向に対して、平行方向に固定磁場H<sub>p</sub>が印加され、垂直方向に可変磁場H<sub>e</sub>が印加されている。この固定磁場H<sub>p</sub>は、例えば、後述するような永久磁石等によって発生し(第1磁石)、ファラデー回転子の磁化を飽和させるのに十分な磁場(飽和磁化をMとする)を与える。また、可変磁場H<sub>e</sub>は、例えば、後述するような電磁石等によって発生し(第2磁石)、該電磁石への印加電流Iを変化させることで可変となる。したがって、固定磁場H<sub>p</sub>と可変磁場H<sub>e</sub>の合成磁場H<sub>p</sub>+H<sub>e</sub>は、印加電流Iの大きさに応じて、その大きさおよび方向を変える。

【0014】ファラデー回転子のファラデー回転角は磁場の強さと光線に対する磁場の角度で決まるが、ファラデー回転子は光線に平行な磁場H<sub>p</sub>により磁化が飽和に達しているので、光線に垂直な磁場H<sub>e</sub>が変化し、合成磁場H<sub>p</sub>+H<sub>e</sub>の光線に対する角度が変化することで、光線方向成分に対する磁化の強さM'が変化する。この光線方向成分に対する磁化の強さM'の変化によりファラデー回転が可変できる。

【0015】上記のような基本構成を有する可変光減衰器では、図1(B)の光線追跡に示すように、入力光ファイバーINから出射された光線Rが、偏光子2(例えば、くさび型ルチル等)において、そのくさび角に従い常光線oと異常光線eに分離される。分離された常光線oおよび異常光線eは、それぞれ、ファラデー回転子1において光線方向の磁化成分M'の大きさに比例したファラデー回転を受けた後に、検光子3(例えば、くさび型ルチル等)に入射される。ここでは検光子3の光学軸が、印加電流Iを略零とした時のファラデー回転角に対してほぼ平行となるように配置されており(光学軸の詳細については後述する)、偏光子2での常光線oのうち、検光子3でも常光線に相当する成分(図中のo→o成分)が、出力光ファイバーOUTに結合するようになる。また、これと同様にして、偏光子2での異常光線eのうち、検光子3でも異常光線に相当する成分(図中のe→e)も出力光ファイバーOUTに結合する。さらに、偏光子2での常光線oおよび異常光線eについて、検光子3で分離される常光線成分と異常光線成分の各比率は、ファラデー回転角が可変磁場H<sub>e</sub>の大きさに応じて可変であるので、所要の値に設定することが可能である。つまり、上記の比率はファラデー回転角に応じて変化するため、出力光ファイバーOUTに結合する光量を変えることが可能となり可変光減衰器として機能するようになる。

【0016】ここで、偏光子2と検光子3の光学軸の関係について説明する。図2は、一般的な光学軸の関係を示す図である。ただし、各光学軸は、図1(A)の矢印Aに示す方向から見た場合を示している。また、図示した角度については、偏光子2の光学軸を基準(0°)とし、反時計回りの方向を正としている。

【0017】前述したように、入力光線Rは偏光子2を

透過することによって、その光学軸に平行な偏波面を持つ異常光線eと、これに垂直な偏波面を持つ常光線oとに分離される。以下の説明では、分離された光線のうち、異常光線eについての偏波の動きを具体的に考える。なお、常光線oについては、異常光線eと直交したものであるので、後述の内容について角度を90°回転した場合を想定すればよいため、ここでの説明を省略する。

【0018】偏光子2を透過した異常光線eは、次にファラデー回転子1を透過するが、このとき、可変磁場H<sub>e</sub>の大きさに応じた所要のファラデー回転を受ける。例えば、電磁石への印加電流Iが0に設定されて可変磁場H<sub>e</sub>が殆ど発生していないときには、永久磁石による固定磁場H<sub>p</sub>のみとなるため、ファラデー回転子1の磁化の光線方向成分M'が飽和磁化Mと等しくなって、ファラデー回転角θ<sub>f</sub>としては最大値θ<sub>max</sub>が得られる。最大角度θ<sub>max</sub>のファラデー回転を受けた光線は、検光子3の光学軸に平行な成分が、検光子3における異常光成分となって、この成分のみが出力光ファイバーOUTに結合する。このとき(θ<sub>f</sub> = θ<sub>max</sub>, I = 0)発生する

$$ATT [dB] = -10 \cdot \log_{10} [\cos^2(\theta_p - \theta_f) + 10^{(-ER/10)}] \dots (1)$$

ここで、ERは、ファラデー回転子1として用いられる光学結晶の消光比を表しており、可変光減衰における最大値を表すものである。

【0021】次に、上述したような従来の可変光減衰器における波長依存性の発生原因について説明する。図3は、ファラデー回転角θ<sub>f</sub>の波長依存性を説明する図である。

【0022】図3において、横軸は、入力光の波長を示し、縦軸は、波長依存性を表す値として、例えば波長1549nmでのファラデー回転角θ<sub>f</sub>を基準としたときの他波長でのファラデー回転角の偏差を示している。上述した可変光減衰器において、光減衰量が約0dBとなるように設定したとき、すなわち、ファラデー回転角θ<sub>f</sub>が最大値θ<sub>max</sub>となるようにした場合には、1535～1563nmの波長範囲におけるファラデー回転角θ<sub>f</sub>の偏差が±2°を超えるようになり、波長依存性の大きいことが分かる。このファラデー回転角θ<sub>f</sub>の波長依存性は、光減衰量を10dB、20dBと大きくする、すなわち、ファラデー回転角θ<sub>f</sub>を小さくするのに伴って、小さくなる傾向を有する。具体的には、光減衰量を20dBに設定したとき、1535～1563nmの波長範囲におけるファラデー回転角θ<sub>f</sub>の偏差が±0.5よりも小さくなり、波長依存性が低減していることが分かる。

【0023】上記のようなファラデー回転角の波長依存性を基に、一般的な可変光減衰器におけるファラデー回転角θ<sub>f</sub>と印加電流Iの関係を算出すると、図4に示すような特性となる。ただし、横軸は印加電流Iを示し、

\*損失は、出力光ファイバーOUTへの結合効率が最も良くなるので、可変光減衰器としての挿入損失となる。

【0019】次に、印加電流Iを変化させて可変磁場H<sub>e</sub>を大きくしていくと、ファラデー回転子1の磁化の光線方向成分M'が減少するのに伴いファラデー回転角θ<sub>f</sub>も小さくなる。これにより、ファラデー回転を受けた光線についての検光子3の光学軸成分が減少するため、出力光ファイバーOUTへの結合効率が低下して、可変の光減衰として観測される。また、ファラデー回転角θ<sub>f</sub>が検光子3の光学軸と直交したときには、ファラデー回転を受けた光線についての検光子3の光学軸成分が0になるため、最大の光減衰量が得られるようになる。このときのファラデー回転角θ<sub>f</sub>をθ<sub>ATTmax</sub>とする。ここで、偏光子2の光学軸2aに対して、検光子3の光学軸3aがファラデー回転子1の回転方向(図2では反時計回りの方向)になす角度をθ<sub>p</sub>とすると、θ<sub>ATTmax</sub> = θ<sub>p</sub> - 90°の関係が成り立つ。

【0020】上述した内容に基づいて、可変光減衰器としての光減衰量ATTを数式化すると、次の(1)式に示す関係で表すことができる。

$$ATT [dB] = -10 \cdot \log_{10} [\cos^2(\theta_p - \theta_f) + 10^{(-ER/10)}] \dots (1)$$

左方の縦軸はファラデー回転角θ<sub>f</sub>を示し、右方の縦軸は、ファラデー回転角の波長依存性Δθ<sub>f</sub>(波長1549nmでのファラデー回転角θ<sub>f</sub>を基準としたときの他波長でのファラデー回転角の偏差)を示している。また、偏光子2と検光子3のなす角度θ<sub>p</sub>は、例えば10°等に設定した場合を想定している。

【0024】図4に示すように、ファラデー回転角の波長依存性Δθ<sub>f</sub>は、印加電流Iが小さなとき程、大きくなることが分かる。これは、印加電流Iが小さなときにファラデー回転角θ<sub>f</sub>が大きくなるためであり、前述の図3に示した関係と同様の特性を表している。

【0025】一方、図4に対応させた光減衰量ATTと印加電流Iの関係を、前述の(1)式を用いて算出すると、図5に示すような特性となる。ただし、横軸は印加電流Iを示し、左方の縦軸は光減衰量ATTを示し、右方の縦軸は光減衰量の波長依存性ΔATT(波長1549nmでの光減衰量ATTを基準としたときの他波長での光減衰量の偏差)を示している。また、光減衰量ATTの最大値(前述の(1)式におけるERの値)は、ここでは25dBに設定して計算を行っている。

【0026】図5に示すように、光減衰量の波長依存性ΔATTは、印加電流Iを約50mAに設定した場合に最も大きくなることが分かる。この場合、具体的には、光減衰量ATTが約21.2dBとなり、1535～1563nmの波長範囲における光減衰量の波長依存性ΔATTが約1.1dBと大きくなる。なお、印加電流Iを約50mAとしたときのファラデー回転角θ<sub>f</sub>は、図4より約19°となる。上記のような光減衰量の波長依存性

存性 $\Delta ATT$ の発生原因は、次のように説明できる。

【0027】(1)式より、光減衰量ATTは、 $\log [\cos^2(\theta_p - \theta_f)]$ の項を含んでいる。この項と $\theta_p - \theta_f$ の関係およびその微分係数は、図6に示すようになる。すなわち、ファラデー回転角 $\theta_f$ が大きい( $\theta_p - \theta_f$ が小さい)とき、 $\log [\cos^2(\theta_p - \theta_f)]$ の微分係数は非常に小さい。つまり、ファラデー回転の波長依存性によって、 $\theta_f$ が変化しても、 $\log [\cos^2(\theta_p - \theta_f)]$ は殆ど影響を受けないことを意味している。

【0028】これに対して、ファラデー回転角 $\theta_f$ が小さい( $\theta_p - \theta_f$ が大きい)ときには、 $\log [\cos^2(\theta_p - \theta_f)]$ の微分係数が、非常に大きくなるため(特に、 $\theta_p - \theta_f$ の値が $85^\circ$ を超えた所から急激に立ち上がる)、 $\log [\cos^2(\theta_p - \theta_f)]$ も大きく変化する。したがって、上記の図5に示したような光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ を示すようになるのである。ただし、光学結晶の消光比によって決定される光減衰量の最大値ER付近(図5においてI=62mA付近)では、光減衰量ATTが頭打ちとなるため、波長依存性 $\Delta ATT$ が例外的に略零になっている。

【0029】ここで重要なことは、光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ は、ファラデー回転子1自体の波長依存性で発生するものの、ファラデー回転角の波長依存性 $\Delta \theta_f$ が必ずしも最大の時に、光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ が最大になるわけではないことである。

【0030】そこで、本発明では、上述したような一般的な基本構成の可変光減衰器について、ファラデー回転角および光減衰量の各波長依存性 $\Delta \theta_f$ 、 $\Delta ATT$ を考慮して、磁気光学系を最適化することで波長依存性の低減された可変光減衰器を実現可能にする。

【0031】具体的には、図1および図2に示したような磁気光学系を有する可変光減衰器では、図4および図5で示したようにファラデー回転角 $\theta_f$ が約 $19^\circ$ の時に、光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ が最大となる。一方で、図3から分かるように、ファラデー回転角 $\theta_f$ が十分小さければ、ファラデー回転角の波長依存性 $\Delta \theta_f$ は小さくなる。つまり、光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ が最大となる状態でのファラデー回転角 $\theta_f$ が、ファラデー回転角の波長依存性 $\Delta \theta_f$ の小さい領域に移るよう(すなわち、ファラデー回転角 $\theta_f$ が $0^\circ$ に近づくよう)、偏光子2の光学軸2aと検光子3の光学軸3aとの関係(なす角度 $\theta_p$ )を最適化することで、光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ を低減できる。

【0032】しかしながら、光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ が最大になるファラデー回転角 $\theta_f$ を $\Delta ATT_{max}$ を略 $0^\circ$ にまで小さくすることは、図1および図2に示したような磁気光学系では不可能である。なぜなら、図1に示したように、一般的な基本構成においては、固定磁場H<sub>p</sub>と可変磁場H<sub>e</sub>が互いに直交しており、ファラデー回転

角 $\theta_f$ を略 $0^\circ$ にするためには、可変磁場H<sub>e</sub>の大きさを無限大にしなければならないが、可変磁場H<sub>e</sub>の大きさが有限であるので、それは困難であることによる。したがって、本発明では、光線方向に対する固定磁場H<sub>p</sub>および可変磁場H<sub>e</sub>の各方向の最適化を行うことで、光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ のさらなる低減を図っている。

【0033】以下、本発明による可変光減衰器の実施形態を図面に基づいて説明する。図7は、本実施形態にかかる可変光減衰器の磁気光学系を示す図であって、

(A)は上面図、(B)は側面図である。

【0034】図7に示すように、本可変光減衰器の磁気光学系は、上述の図1に示した一般的な基本構成の場合と同様にして、入力光ファイバINから出射される光線Rの伝搬方向に沿って、偏光子2、ファラデー回転子1、検光子3が順に配置される。本可変光減衰器では、光線方向に対する偏光子および検光子の各光学軸の位置関係、並びに、ファラデー回転子1に与えられる固定磁場H<sub>p</sub>および可変磁場H<sub>e</sub>の各方向が、一般的な基本構成の場合とはそれぞれ異なるものとなっている。

【0035】ファラデー回転子1は、磁気光学効果の1つであるファラデー効果を有する磁気光学結晶である。この磁気光学結晶としては、例えば、液相エピタキシャル法で作製した(RBi)<sub>3</sub>(FeM)<sub>5</sub>O<sub>12</sub>または(RBi)<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(ただし、Rはイットリウムを含む希土類元素から選ばれた1種以上の元素、Mは鉄と置換できる1種以上の元素)等が知られており、典型的には、Tb<sub>1.00</sub>Y<sub>0.65</sub>Bi<sub>1.35</sub>Fe<sub>4.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>O<sub>12</sub>なる組成である。また、Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>なる組成のガーネット単結晶であってもよい。

【0036】偏光子2および検光子3は、例えば、くさび型ルチル等を用いてそれぞれ形成され、各々の光学軸が次に示すような位置関係を保つように配置されている。図8は、本可変光減衰器における偏光子2および検光子3の各光学軸の位置関係を示す図である。ここでも、上述の図2に示した場合と同様にして、各光学軸は、図7(A)の矢印Aに示す方向から見た場合を示している。また、図示した角度については、偏光子2の光学軸を基準( $0^\circ$ )とし、反時計回りの方向を正としている。

【0037】図8に示すように、本可変光減衰器では、光減衰量の波長依存性が最大となるファラデー回転角 $\theta_f$ を $\Delta ATT_{max}$ が略 $0^\circ$ に一致するように、偏光子2の光学軸2aに対する検光子3の光学軸3aの配置が決定されている。具体的には、図8で破線に示した一般的な基本構成(対応する符号は括弧付きで示す)における検光子の光学軸(3a)を、偏光子の光学軸2aに近づく方向、すなわち、なす角度 $\theta_p$ が小さくなる方向に回転して、光減衰量の波長依存性が最大となるファラデー回転角( $\theta_f$ )を示す破線を偏光子2の光学軸2a上に

略一致させる。このときのなす角度 $\theta_p$ を、ここでは最適化したなす角度 $\theta_{popt}$ とする。

【0038】ただし、本可変光減衰器の各パラメータの設定によっては、一般的な基本構成における光減衰量の波長依存性が最大となるファラデー回転角 $\theta_{ATTmax}$ が略 $0^\circ$ となるようになす角度 $\theta_p$ を最適化しても、光減衰量の波長依存性が最小にはならない場合もあり得る。このような場合には、トータルの減衰量波長依存性が最小になるようになす角度 $\theta_{popt}$ を最適化するのが望ましい。

【0039】上記のような検光子3の光学軸3aの移動に伴って、最大のファラデー回転角 $\theta_{max}$ および光減衰量が最大となるファラデー回転角 $\theta_{ATTmax}$ も小さくなる。図8の例では、光減衰量が最大となるファラデー回転角 $\theta_{ATTmax}$ が負の領域に位置するようになる。このようなファラデー回転角 $\theta_f$ の可変制御を実現するためには、ファラデー回転子1に印加される磁場の状態を規定する必要がある。

【0040】図9は、図7の可変光減衰器における光線方向R、固定磁場H<sub>p</sub>および可変磁場H<sub>e</sub>の関係を示す図である。この図示した関係は、図7(A)に示した磁場の関係を具体的に表したものに対応する。

【0041】図9に示すように、可変光減衰器では、例えば、固定磁場H<sub>p</sub>が光線方向Rに対して平行に与えられると共に、可変磁場H<sub>e</sub>が光線方向Rに対して $90 + \theta_0$  ( $\theta_0 > 0$ )なる角度を有するものとする。角度 $\theta_0$ の具体的な値としては、例えば $15^\circ$ 等とすることができる。ただし、本発明における角度 $\theta_0$ の値はこれに限られるものではなく、 $0^\circ$ よりも大きな任意の角度に設定可能である。

【0042】上記のような固定磁場H<sub>p</sub>および可変磁場H<sub>e</sub>によって形成される合成磁場H<sub>e+H\_p</sub>のベクトルが、光線方向Rに対して直交すれば、磁化の光線方向成分M' = 0となるため、ファラデー回転角 $\theta_f = 0^\circ$ が実現されて、ファラデー回転の波長依存性 $\Delta\theta_f = 0$ になる。

【0043】具体的に、可変磁場H<sub>e</sub>の大きさの変化に対応させて説明すると、可変磁場H<sub>e</sub>の大きさが0のときには、ファラデー回転子1に対して固定磁場H<sub>p</sub>のみが与えられ、光線軸と平行な飽和磁化Mによって最大のファラデー回転角 $\theta_{max}$ が得られる。可変磁場H<sub>e</sub>の大きさがH<sub>e1</sub>に増大したときには、ファラデー回転子1に対して合成磁場H<sub>e1+H\_p</sub>が与えられ、磁化Mの光線方向成分M' (> 0)に応じた正のファラデー回転角 $\theta_f$  (<  $\theta_{max}$ )が得られる。また、可変磁場H<sub>e</sub>の大きさがH<sub>e2</sub>に増大したときには、光線軸に直交する合成磁場H<sub>e2+H\_p</sub>がファラデー回転子1に対して与えられ、磁化Mの光線方向成分M' が0となってファラデー回転角 $\theta_f$ も0となる。この可変磁場H<sub>e2</sub>の状態において、ファラデー回転角の波長依存性 $\Delta\theta_f$ が最も小

さくなる。さらに、可変磁場H<sub>e</sub>の大きさがH<sub>e3</sub>に増大したときには、ファラデー回転子1に対して合成磁場H<sub>e3+H\_p</sub>が与えられ、磁化Mの光線方向成分M' (< 0)に応じた負のファラデー回転角 $\theta_f$ が得られる。ここでは、前述の図8に示したように、ファラデー回転角 $\theta_f$ が負になる領域において、最大の光減衰量が実現される。

【0044】ここで、上記のような固定磁場H<sub>p</sub>および可変磁場H<sub>e</sub>をファラデー回転子1に与えるための磁場発生手段としての構成について簡単に説明する。図10は、本可変光減衰器において、ファラデー回転子1に磁場を与える具体的な構成例を示す斜視図である。

【0045】図10の構成例では、例えば、円形の永久磁石11, 12が、ファラデー回転子1の前後に位置する光線軸上に極性を揃えてそれぞれ配置され、固定磁場H<sub>p</sub>を発生する。また、電磁石13のヨークが、ファラデー回転子1を挟むように配置され、この電磁石13への印加電流Iに応じて、所要の大きさの可変磁場H<sub>e</sub>が発生する。

【0046】このような構成の可変光減衰器では、上述したような動作原理に基づいて、電磁石13への印加電流Iが可変制御されることにより、ファラデー回転角 $\theta_f$ が調整されて、出力光ファイバーOUTに結合する光量が制御される。このとき、本可変光減衰器における光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ は、前述したようにファラデー回転角の波長依存性を考慮して磁気光学系が最適化されているため、大幅に低減されることになる。

【0047】図11は、本実施形態の可変光減衰器におけるファラデー回転角 $\theta_f$ と印加電流Iの関係を算出した結果を示す図である。また、図12は、図11に対応させた光減衰量ATTと印加電流Iの関係を、上述の(1)式を用いて算出した結果を示す図である。ただし、図11の横軸および縦軸に示す値は、上述した図4の場合と同様であり、図12の横軸および縦軸に示す値は、上述した図5の場合と同様である。

【0048】各図に示した関係の算出にあたっては、例えば、角度 $\theta_0$ を $15^\circ$ として光線方向に対する可変磁場H<sub>e</sub>のなす角度を $105^\circ$ に設定し、光減衰量の最大値E<sub>R</sub>を $25dB$ に設定した。また、偏光子2および検光子3の各光学軸2a, 3aがなす角度 $\theta_p$ は、図5に示した光減衰量の温度依存性 $\Delta ATT$ を基に最適化を図った角度 $\theta_{popt}$ を用いた。

【0049】図11に示すように、本可変光減衰器では、光線方向に対する可変磁場H<sub>e</sub>のなす角度を $105^\circ$ に設定したことで、ファラデー回転角 $\theta_f$ が $0^\circ$ となる点が生じていることが分かる。具体的には、印加電流Iを約 $40mA$ 付近に設定したときにファラデー回転角 $\theta_f$ が $0^\circ$ となり、その波長依存性 $\Delta\theta_f$ が最小になっている。これにより、図12に示すように、印加電流Iを約 $40mA$ 付近に設定したときに、光減衰量の波長依

存性 $\Delta ATT$ が一旦最小になっていることが分かる。また、偏光子2および検光子3の各光学軸2a, 3aのなす角度を $\theta_{popt}$ としたことで、光減衰量が最大となる状態は、約60mAに設定したときに実現するようになり、この状態におけるファラデー回転角 $\theta_{ATTmax}$ は、図11より-7°程度の負の値になっている。

【0050】一般に、可変光減衰器は、光減衰量が単調増加（または減少）している範囲が使用域となるため、図12のような光減衰特性では、印加電流Iがおよそ0~60mAの範囲が使用域に相当することになる。このような使用域についての光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ は、使用域中間の40mA付近で一旦0dBとなり、最大でも約0.26dBという小さな値になっている。図5に示した光減衰量の温度依存性 $\Delta ATT$ の使用域内での最大値が約1.1dBであったのに比べて、本可変光減衰器の波長依存性が大幅に低減されていることが分かる。

【0051】上述したように本実施形態によれば、ファラデー回転角 $\theta_f$ の波長依存性 $\Delta \theta_f$ を考慮して、偏光子2および検光子3の各光学軸2a, 3aの配置を最適化することで、光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ の低減化を図ることができる。また、光線方向に対する固定磁場H<sub>p</sub>および可変磁場H<sub>e</sub>の方向を規定することで、ファラデー回転角 $\theta_f$ を0°することが可能になる。このファラデー回転角 $\theta_f$ が0°となる状態は、光減衰量が0から最大値まで単調に変化する範囲内で実現されるため、可変光減衰器の使用域すべてに亘る光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ を小さくすることができます。このような波長依存性の低減された可変光減衰器を用いて各種の光伝送システムを構築することは有用である。

【0052】なお、上述した実施形態では、光減衰量の波長依存性が最大になるファラデー回転角 $\theta_{ATTmax}$ が略0°となるように偏光子2および検光子3の各光学軸2a, 3aの最適化を行ったが、本発明はこれに限られるものではなく、一般的な基本構成におけるファラデー回転角 $\theta_{ATTmax}$ が少しでも小さくなるように各光学軸2a, 3aの配置を変更することによって、光減衰量の波長依存性の低減効果を得ることが可能である。

【0053】例えば、偏光子2および検光子3のなす角度 $\theta_p$ を105°（図2の構成）から100°に変更して、ファラデー回転角 $\theta_{ATTmax}$ を0°方向に5°だけ近づけた場合を考えてみる。

【0054】図13は、上記の場合におけるファラデー回転角 $\theta_f$ と印加電流Iの関係を算出した結果を示す図である。また、図14は、図13に対応させた光減衰量ATTと印加電流Iの関係を、上述の（1）式を用いて算出した結果を示す図である。

【0055】図13に示すように、なす角度 $\theta_p$ を100°に小さくしただけでは、ファラデー回転角 $\theta_{ATTmax}$ を0°とすることができないが、図14に示

すように、使用域内での光減衰量の波長依存性 $\Delta ATT$ を約0.8dB以下にまで低減できることが分かる。

【0056】また、上述した実施形態では、光線方向R、固定磁場H<sub>p</sub>および可変磁場H<sub>e</sub>を図9に示したような関係となるように設定したが、本発明はこれに限られるものではなく、例えば、図15または図16に示すような応用も可能である。

【0057】図15の例では、光線方向Rおよび固定磁場H<sub>p</sub>が、ファラデー回転子1の中心軸（図の一点鎖線）に対してθ0°傾けられると共に、可変磁場H<sub>e</sub>が、ファラデー回転子1の中心軸に直交する方向とされている。このような磁場の関係としても、図9に示した場合と同様に、可変磁場H<sub>e</sub>の大きさがH<sub>e2</sub>となったとき、光線方向に直交する合成磁場H<sub>e2+hp</sub>がファラデー回転子1に対して与えられ、磁化Mの光線方向成分が0となってファラデー回転角 $\theta_f$ も0となる。

【0058】図16の例では、光線方向Rが、ファラデー回転子1の中心軸（図の一点鎖線）に対してθ0°傾けられ、固定磁場H<sub>p</sub>が、ファラデー回転子1の中心軸と平行な方向とされ、可変磁場H<sub>e</sub>が、ファラデー回転子1の中心軸に直交する方向とされている。すなわち、光線方向Rをθ0°傾ける場合、固定磁場H<sub>p</sub>の方向は必ずしも傾ける必要はないという一例である。これは、ファラデー回転角 $\theta_f$ が光線方向に沿った磁化の大きさによって決まり、固定磁場H<sub>p</sub>の光線方向成分H<sub>p'</sub>がファラデー回転子1の磁化を飽和させるのに十分であれば、固定磁場H<sub>p</sub>を傾けなくてもよいことを示している。

【0059】上述の図9、図15または図16に示した磁場の配置は、本可変光減衰器をデバイス化する際、それぞれの特徴を考慮して適宜に選択すればよい。具体的には、光線方向を傾かせる方式（図15、図16）は、出入力光ファイバーをも傾かせることを意味しており、デバイスとして実装し難くなる虞があるので注意する。また、可変磁場H<sub>e</sub>をファラデー回転子1に対して傾かせる方式（図9）は、ファラデー回転子1に対して、電磁石13の磁場が斜方より最適に印加されるようにヨークの形状等を工夫する必要がある。例えば、ヨークを大きくするなど措置が必要となり、デバイスが大きくなる可能性があるため注意する。なお、光線方向のみを傾かせる方式（図16）は、図10に示したようなリング状の永久磁石ではなく、円柱状または立方体などの形状の永久磁石を用いてデバイス化することが可能となる。例えば円柱状の永久磁石は、一般にその中心線上で磁場が安定しているため、永久磁石による固定磁場H<sub>p</sub>が安定し易く、これは可変光減衰器の特性の安定化につながるという利点がある。

【0060】さらに、上述した実施形態では、角度θ0°を15°に設定した場合を示したが、本発明はこの設定に限られるものではない。例えば、θ0°を大きくして2

$0^\circ$ に変更し、その他の設定を同一とした場合を考える。

【0061】図17は、上記の場合におけるファラデー回転角 $\theta_f$ と印加電流Iの関係を算出した結果を示す図である。また、図18は、図17に対応させた光減衰量ATTと印加電流Iの関係を、上述の(1)式を用いて算出した結果を示す図である。

【0062】図18に示すように、 $\theta_0 = 20^\circ$ としたときの光減衰量の波長依存性ATTは、 $\theta_0 = 15^\circ$ としたときのそれと殆ど変化はないが、最大の光減衰量ATTを発生する電流値が約60mAから40mAに減少している。これは、光減衰量ATTの可変制御に要求される精度を確保できる範囲内で、角度 $\theta_0$ をできるだけ大きく設定することにより、可変光減衰器としての消費電力の低減が図られることを意味している。

【0063】加えて、最大の光減衰量ERを25dBに設定した場合を示したが、この設定についても任意に設定することが可能である。例えば、最大の光減衰量ERを30dBとし、その他の設定を同一とした場合を考える。

【0064】図19は、上記の場合におけるファラデー回転角 $\theta_f$ と印加電流Iの関係を算出した結果を示す図である。また、図20は、図19に対応させた光減衰量ATTと印加電流Iの関係を、上述の(1)式を用いて算出した結果を示す図である。

【0065】図20に示すように、ER=30dBとしたときの光減衰量の波長依存性ATTの最大値は、約0.57dBとなっていて、ER=25dBとしたとき(図12)に比べて増大している。しかしながら、この波長依存性ATTの増大につても、最適化したなす角度 $\theta_{popt}$ を再び最適化することで低減できる。具体的には、なす角度 $\theta_{popt}$ を数度大きく設定することで、ERを大きくしたときの光減衰量の波長依存性ATTの増大を低減できる。

【0066】図21および図22は、ER=30dBとして、なす角度 $\theta_{popt}$ を再度最適化したときの特性を示す図である。また、図23および図24には、ER=40dBとして、なす角度 $\theta_{popt}$ を再度最適化したときの特性も示しておく。各図に示すように、最大光減衰量ERの設定を変更した場合においても、該設定に応じて偏光子2および検光子3の各光学軸がなす角度 $\theta_p$ を最適化することによって、光減衰量の波長依存性ATTを十分に低減することができる。ただし、最大光減衰量ERを大きくするほど、光減衰量の波長依存性ATTが増大する傾向があることに注意する。最大光減衰量ERの各設定に応じた波長依存性ATTの最大値は、例えば、0.26dB (ER=25dB)、0.31dB (ER=30dB)、0.34dB (ER=40dB)等のようになる。

【0067】なお、上記の傾向に関連して、光減衰量の

波長依存性ATTを0dBから最大減衰量ERの範囲全てにおいて低減する必要がない場合も考えられることを簡単に説明しておく。

【0068】例えば、最大光減衰量ER=40dBは、光伝送機器の緊急時等におけるシャットダウン機能に用い、通常運用時に用いる光レベル調整は、光減衰量が20dB程度である場合が想定できる。このような場合、光減衰量の波長依存性ATTを考慮すべき範囲は、0~20dBの間であり、光のシャットダウン時に波長依存性ATTの大小は問われない。したがって、可変光減衰器として、光減衰量の波長依存性ATTを考慮する、光減衰量ATTの範囲を決めることが有用である場合も考えられる。

【0069】図25および図26は、上記のような場合を想定し、ER=40dBにおいて光減衰量の波長依存性の低減範囲を0~20dBに限定して特性の算出を行った結果を示す図である。図26に示すように、光減衰量ATTが20dB以下の範囲における、光減衰量の波長依存性ATTの最大値が約0.24dBになっており、図24に示した設定の場合と比較して、波長依存性ATTの低減化が図られていることが分かる。

#### 【0070】

【発明の効果】以上説明したように、本発明のファラデー効果を利用した可変光減衰器は、ファラデー回転角の波長依存性を考慮して、直線偏光を切り出す素子の各光学軸のなす角度を設定することで、光減衰量の波長依存性の低減化を図ることができる。また、磁場発生手段について固定磁場および可変磁場の各方向を規定することで、ファラデー回転角を $0^\circ$ に設定可能になるため、光減衰量の波長依存性をより低減することができる。このような波長依存性の低減された可変光減衰器を用いてWDM光伝送システム等の各種光伝送システムを構成すれば、安定した光伝送を実現することが可能になる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】一般的な可変光減衰器の磁気光学系を示す図であって、(A)は上面図、(B)は側面図である。

【図2】一般的な可変光減衰器における偏光子および検光子の各光学軸の関係を示す図である。

【図3】一般的な可変光減衰器におけるファラデー回転角の波長依存性を説明する図である。

【図4】一般的な可変光減衰器のファラデー回転角と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図5】図4に対応させて光減衰量と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図6】一般的な可変光減衰器における光減衰量の波長依存性の発生原因を説明する図である。

【図7】本発明の実施形態にかかる可変光減衰器の磁気光学系を示す図であって、(A)は上面図、(B)は側面図である。

【図8】本発明の実施形態における偏光子および検光子

の各光学軸の位置関係を示す図である。

【図9】本発明の実施形態における光線方向、固定磁場および可変磁場の関係を示す図である。

【図10】本発明の実施形態において、ファラデー回転子に磁場を与える具体的な構成例を示す斜視図である。

【図11】本発明の実施形態におけるファラデー回転角と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図12】図11に対応させて光減衰量と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図13】本発明の実施形態に関連して、角度 $\theta_p$ を100°に設定した場合のファラデー回転角と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図14】図13に対応させて光減衰量と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図15】本発明の実施形態に関する光線方向、固定磁場および可変磁場の他の関係を示す図である。

【図16】本発明の実施形態に関する光線方向、固定磁場および可変磁場のさらに別の関係を示す図である。

【図17】本発明の実施形態に関連して、角度 $\theta_p$ を20°に設定した場合のファラデー回転角と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図18】図17に対応させて光減衰量と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図19】本発明の実施形態に関連して、最大光減衰量ERを30dBに設定した場合のファラデー回転角と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図20】図19に対応させて光減衰量と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図21】本発明の実施形態に関連して、最大光減衰量ERを30dBに設定し、角度 $\theta_{popt}$ を再度最適化し

10

た場合のファラデー回転角と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図22】図21に対応させて光減衰量と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図23】本発明の実施形態に関連して、最大光減衰量ERを40dBに設定し、角度 $\theta_{popt}$ を再度最適化した場合のファラデー回転角と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図24】図23に対応させて光減衰量と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図25】本発明の実施形態に関連して、光減衰量が0~20dBの範囲で波長依存性が低減されるように設定した場合のファラデー回転角と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

【図26】図25に対応させて光減衰量と印加電流の関係を算出した結果を示す図である。

#### 【符号の説明】

1 … ファラデー回転子

2 … 偏光子

20 3 … 検光子

2 a, 3 a … 光学軸

1 1, 1 2 … 永久磁石

1 3 … 電磁石

H p … 固定磁場

H e, H e 1 ~ H e 3 … 可変磁場

I … 印加電流

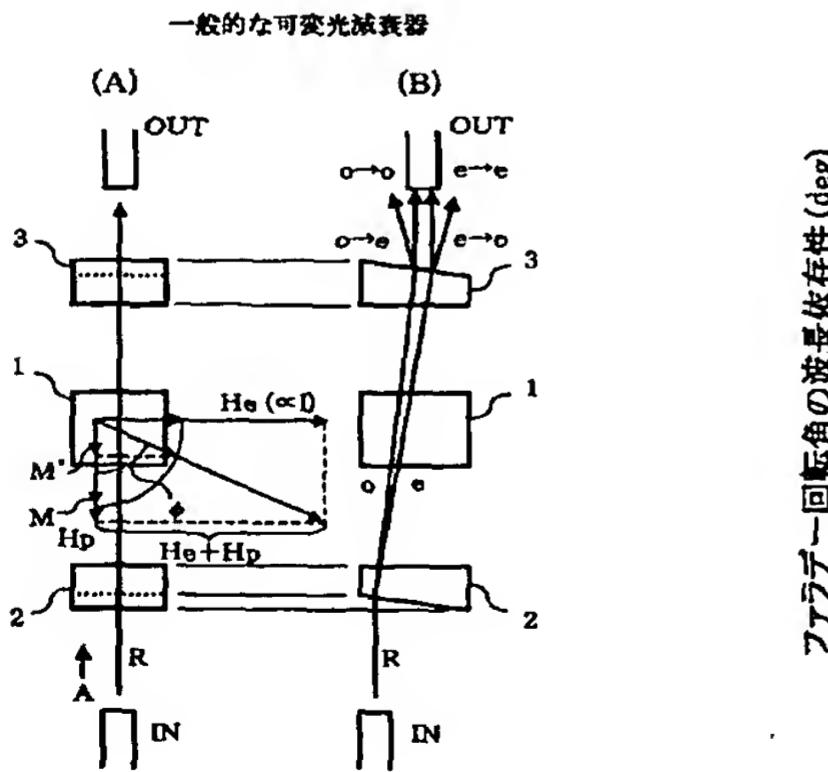
$\theta_f$  … ファラデー回転角

$\theta_p$  … 各光学軸のなす角度

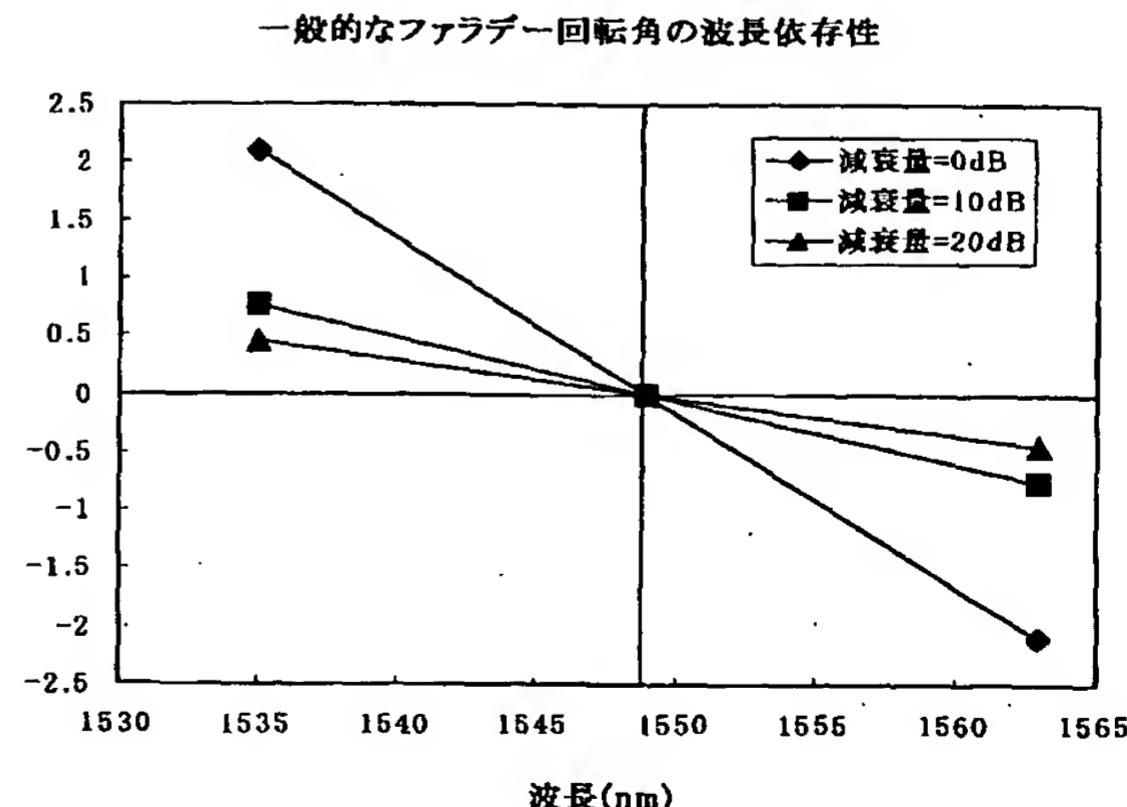
M, M' … 磁化

30 R … 光線方向

【図1】

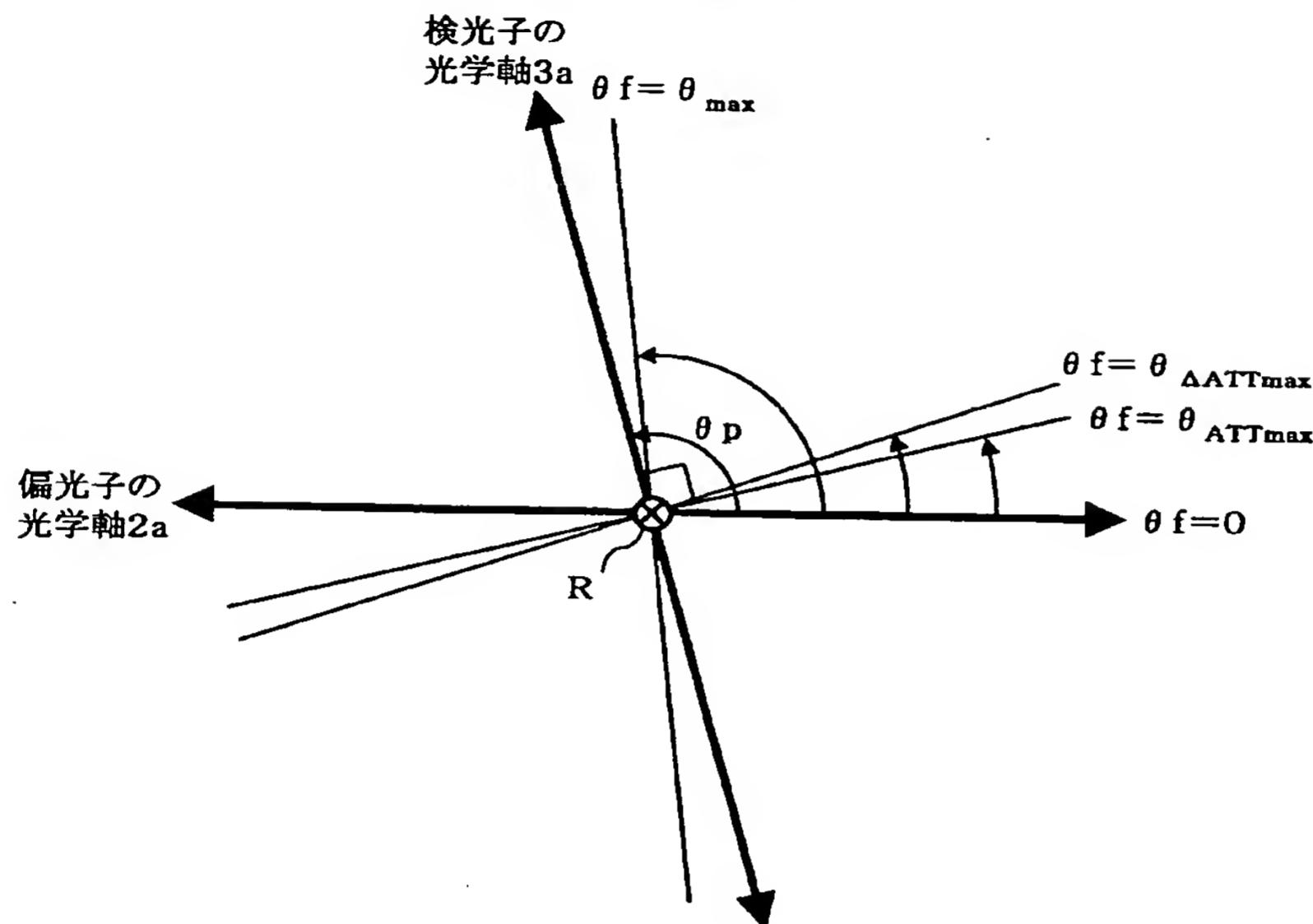


【図3】

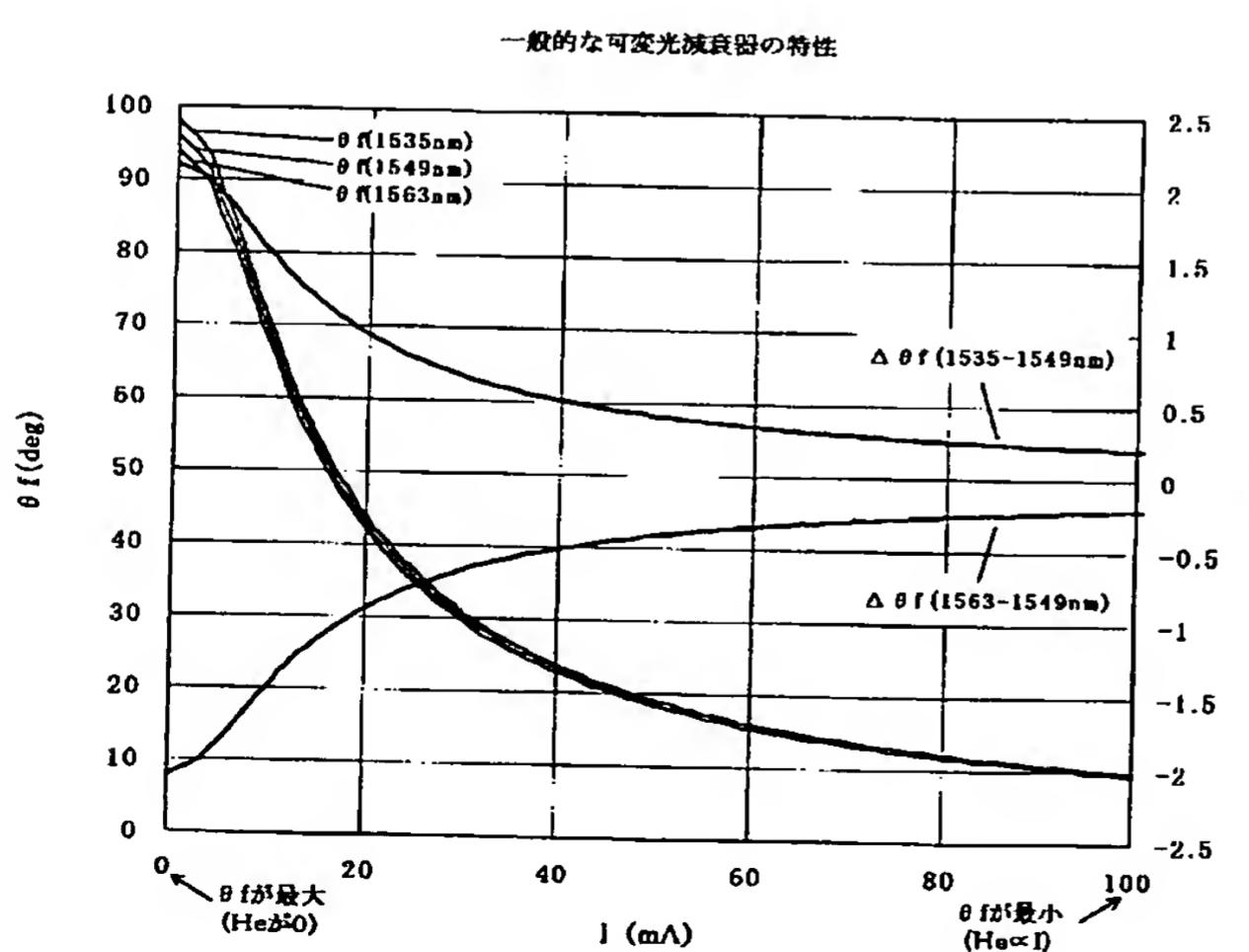


【図2】

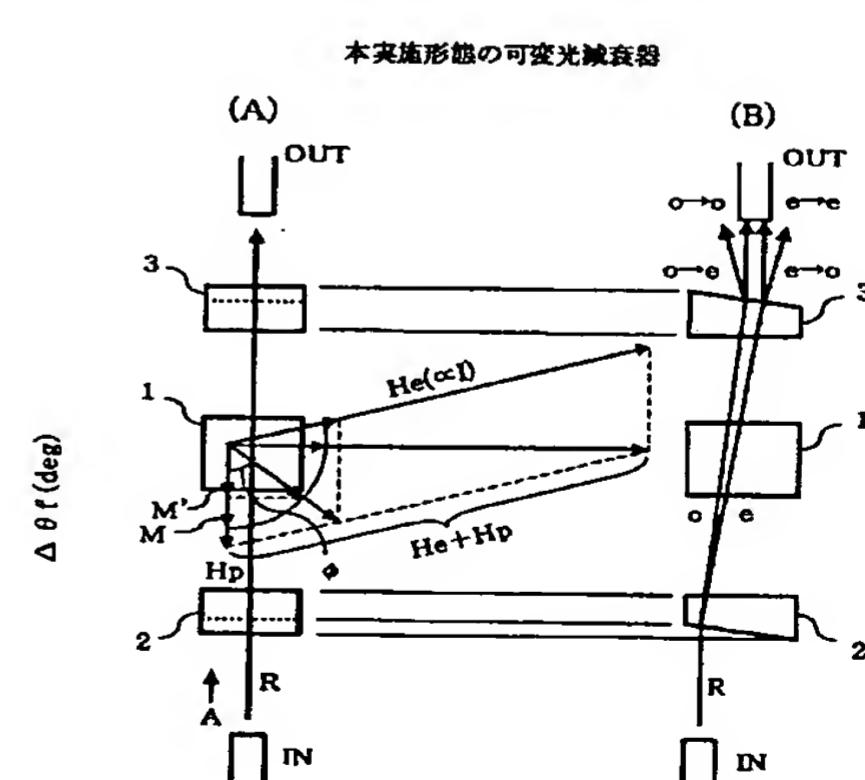
## 一般的な光学軸の関係



【図4】



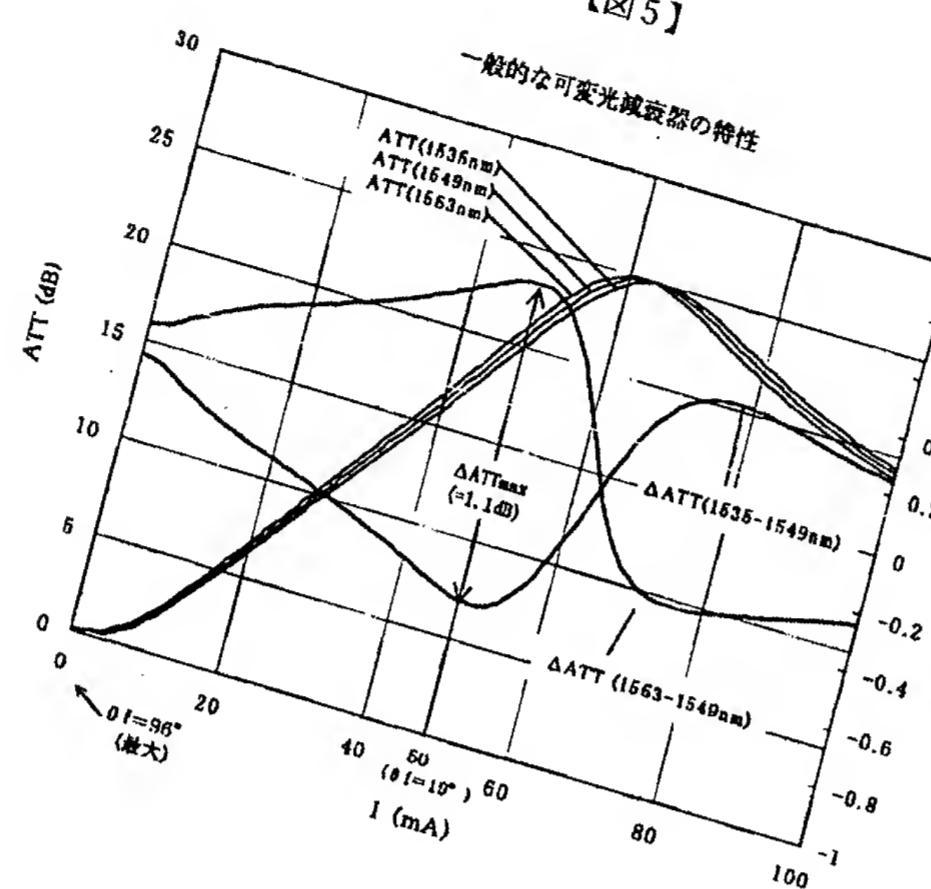
【図7】



特開2001-249313

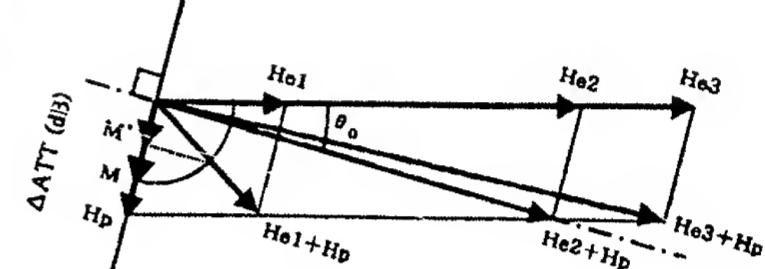
(11)

【図5】

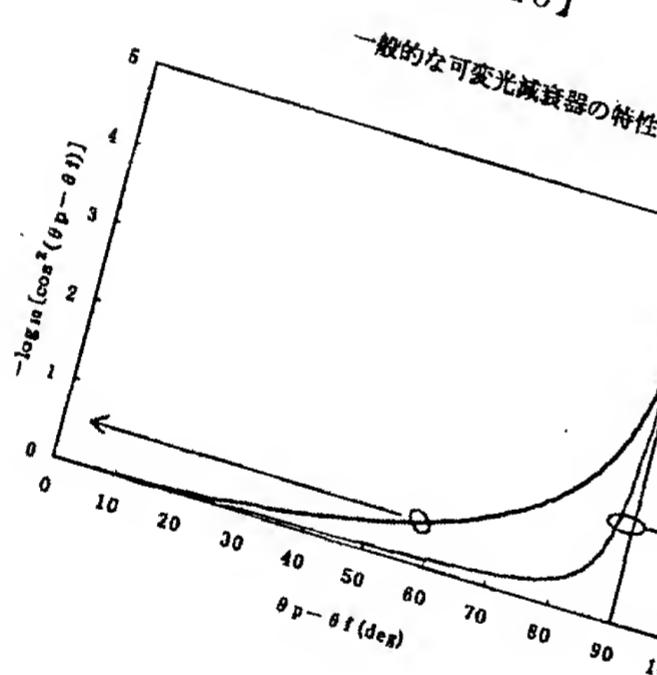


【図9】

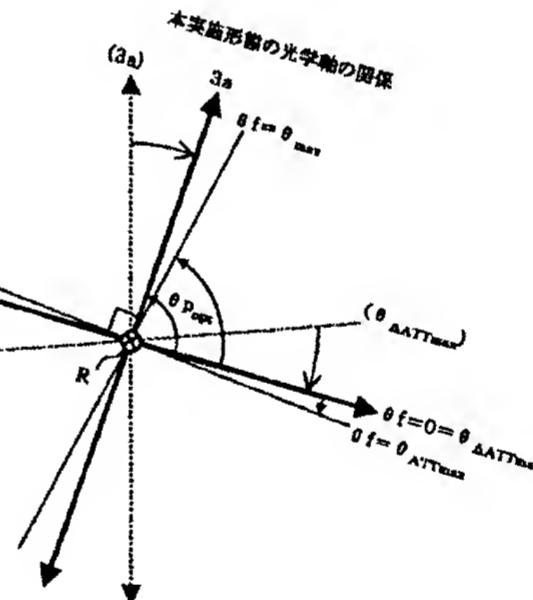
本実施形態の磁場の関係



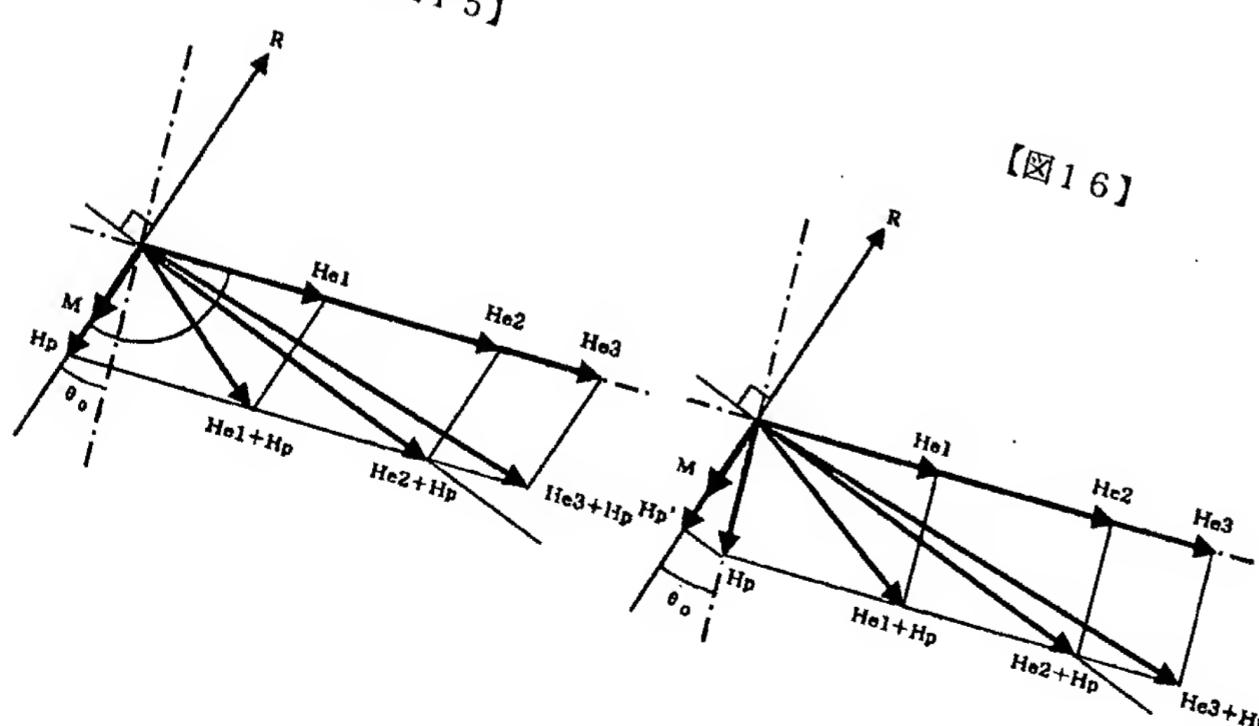
【図6】



【図8】

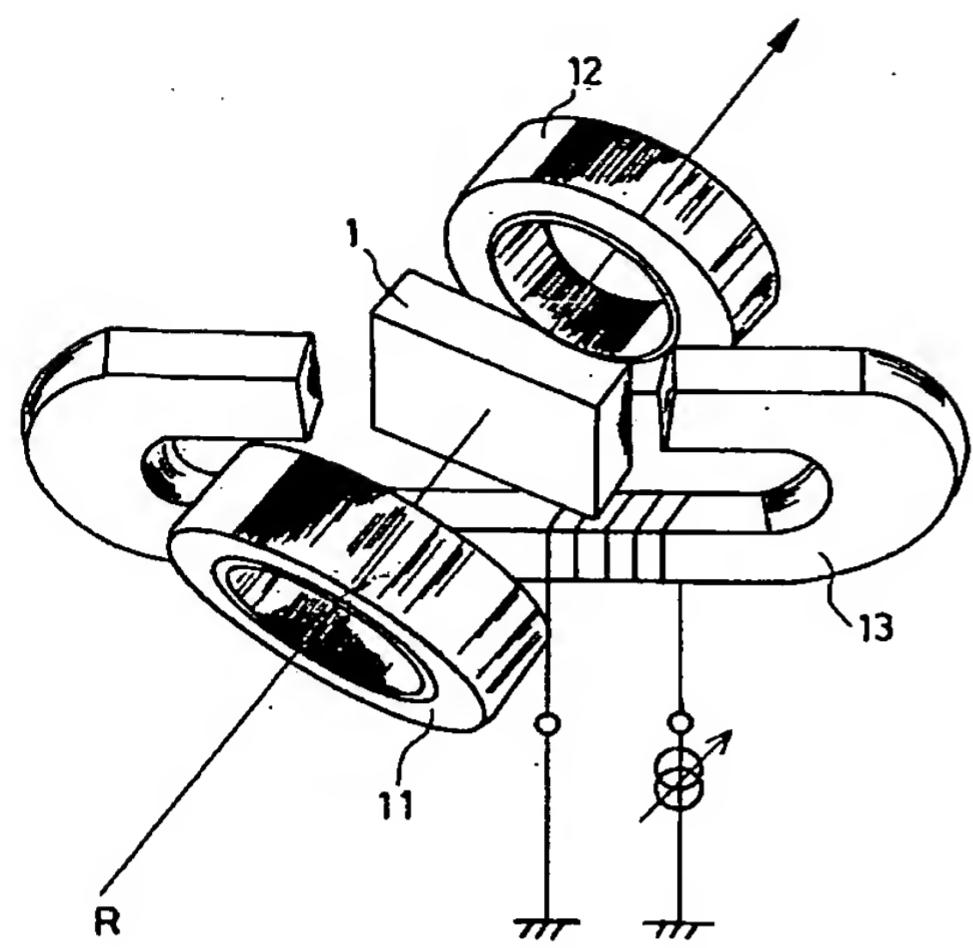


【図15】

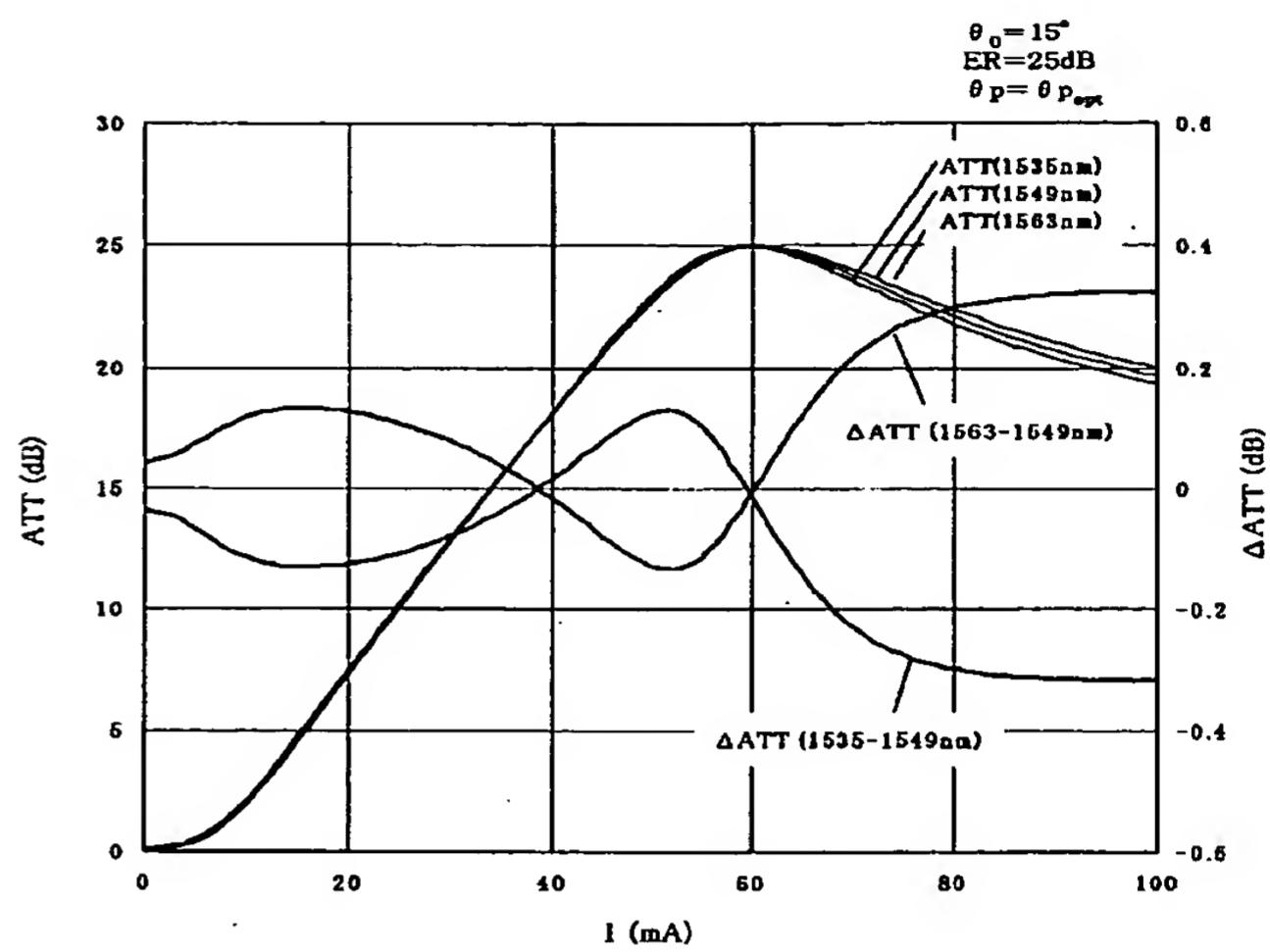


【図16】

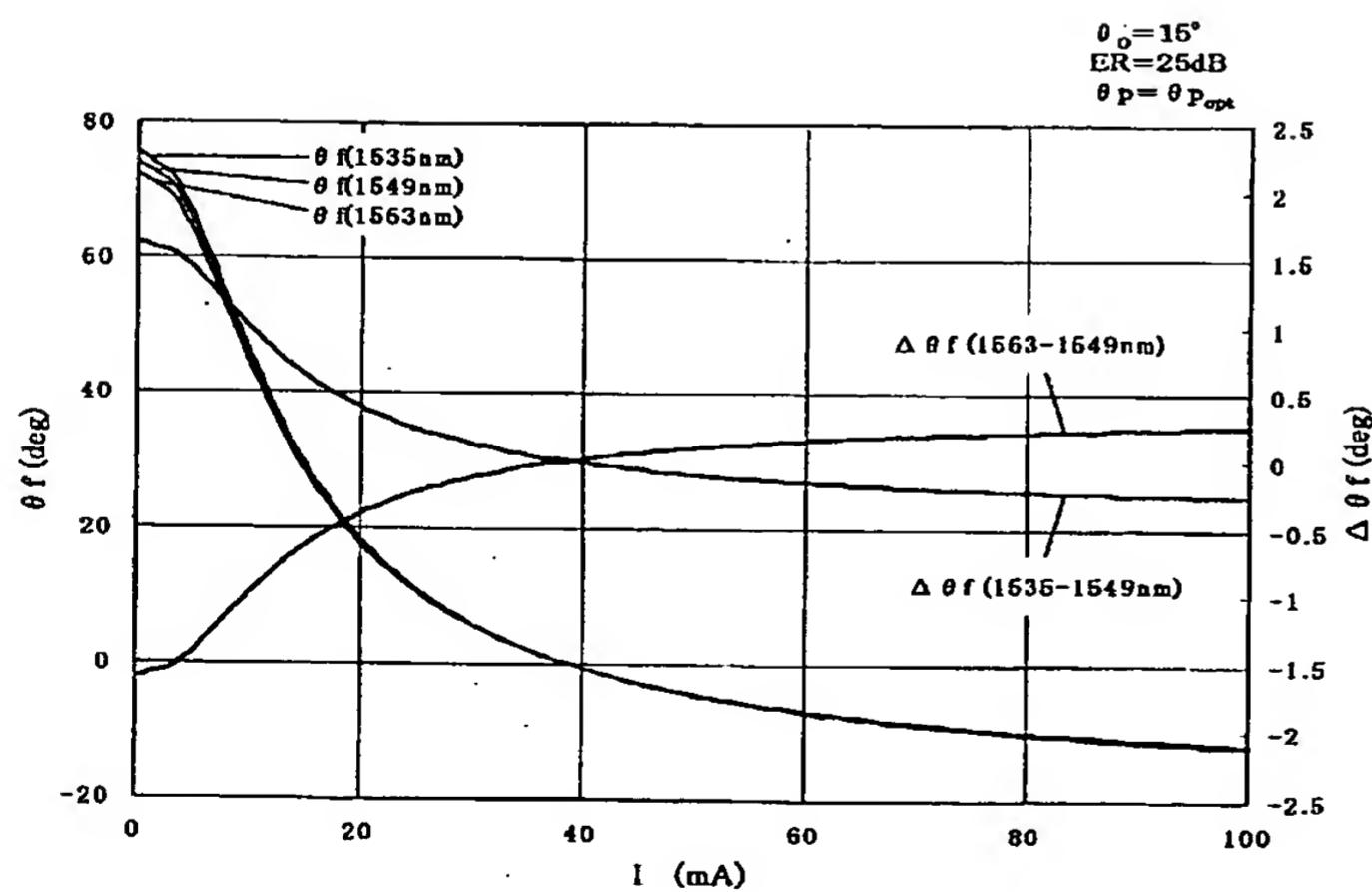
【図10】



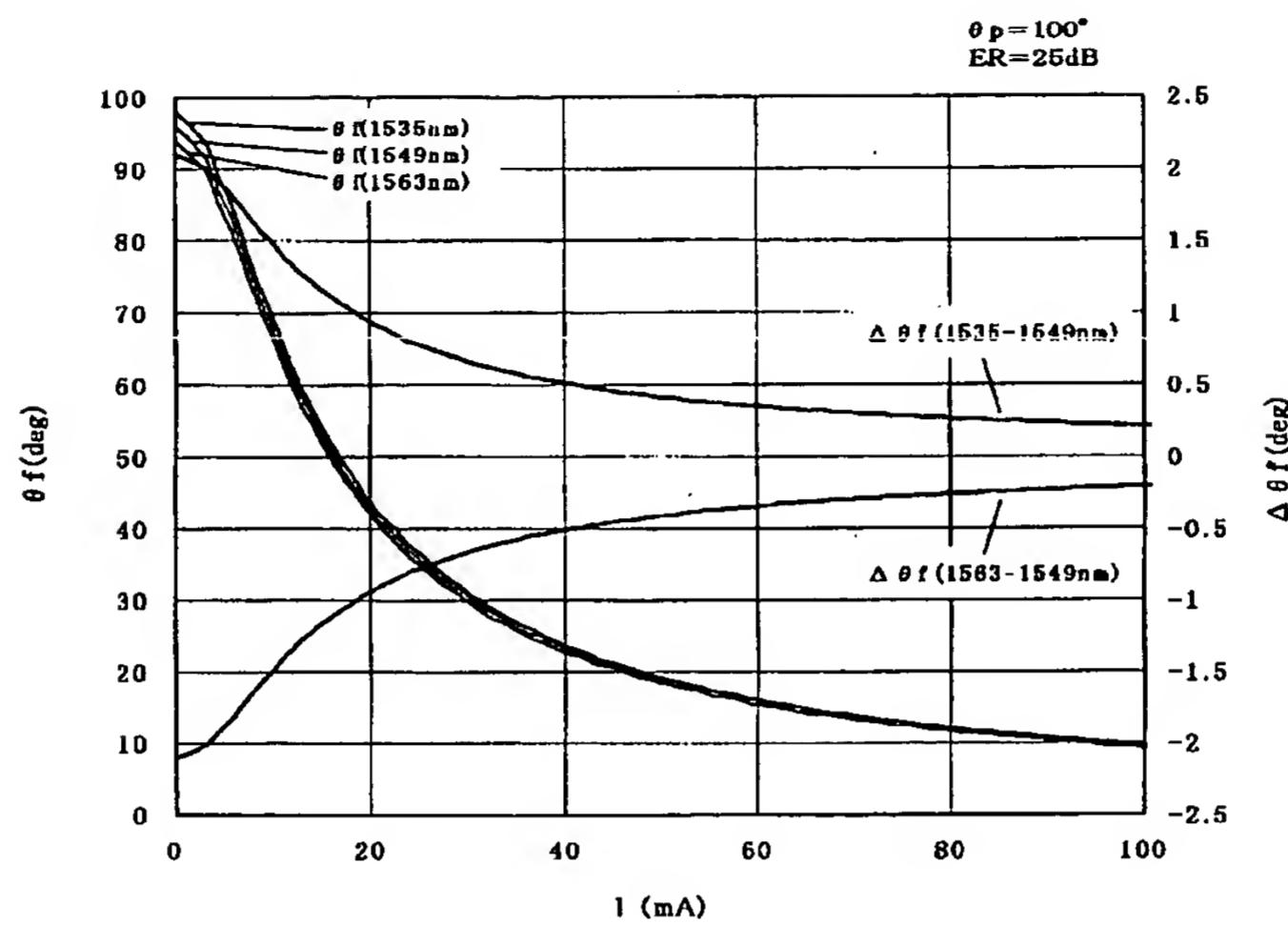
【図12】



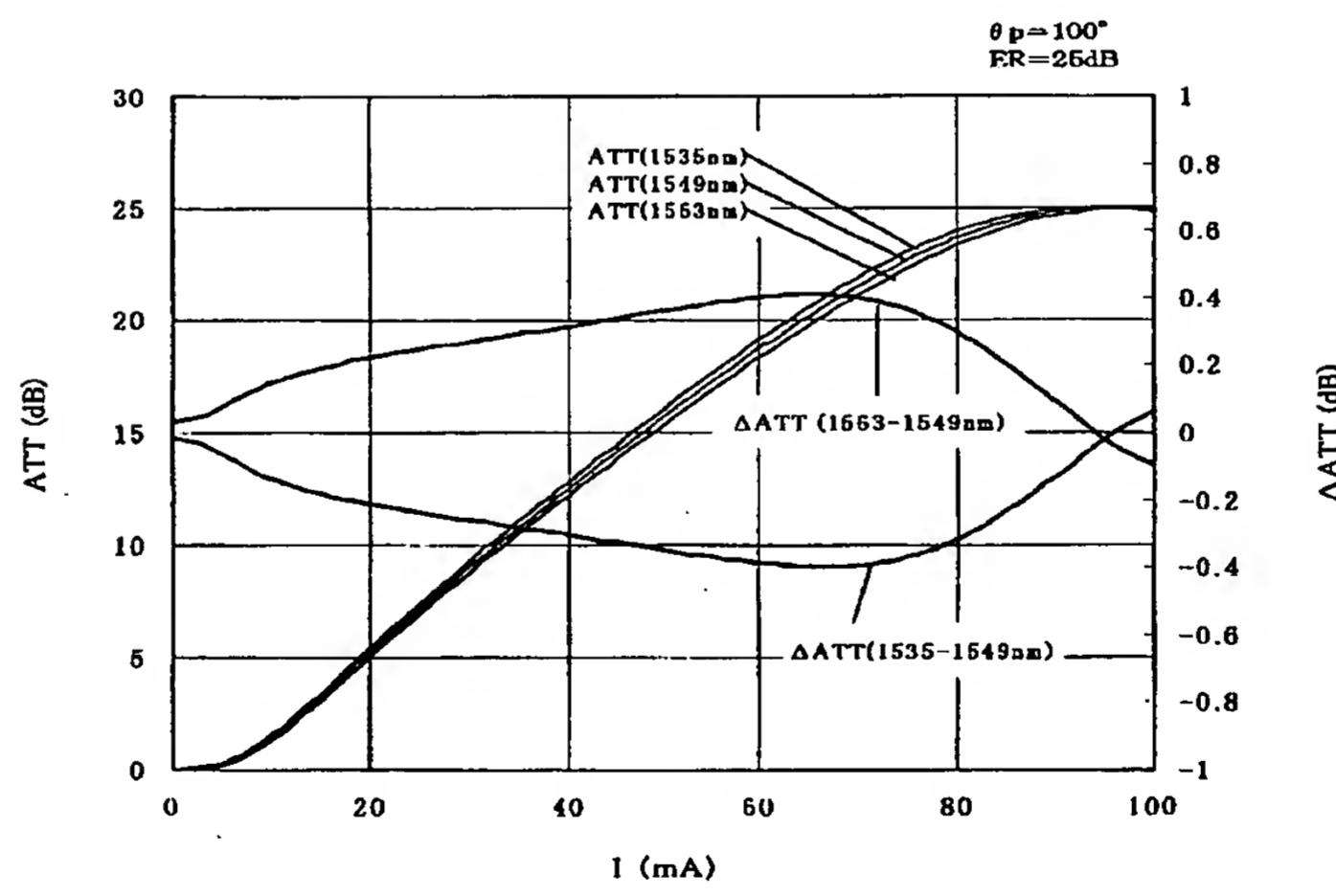
【図11】



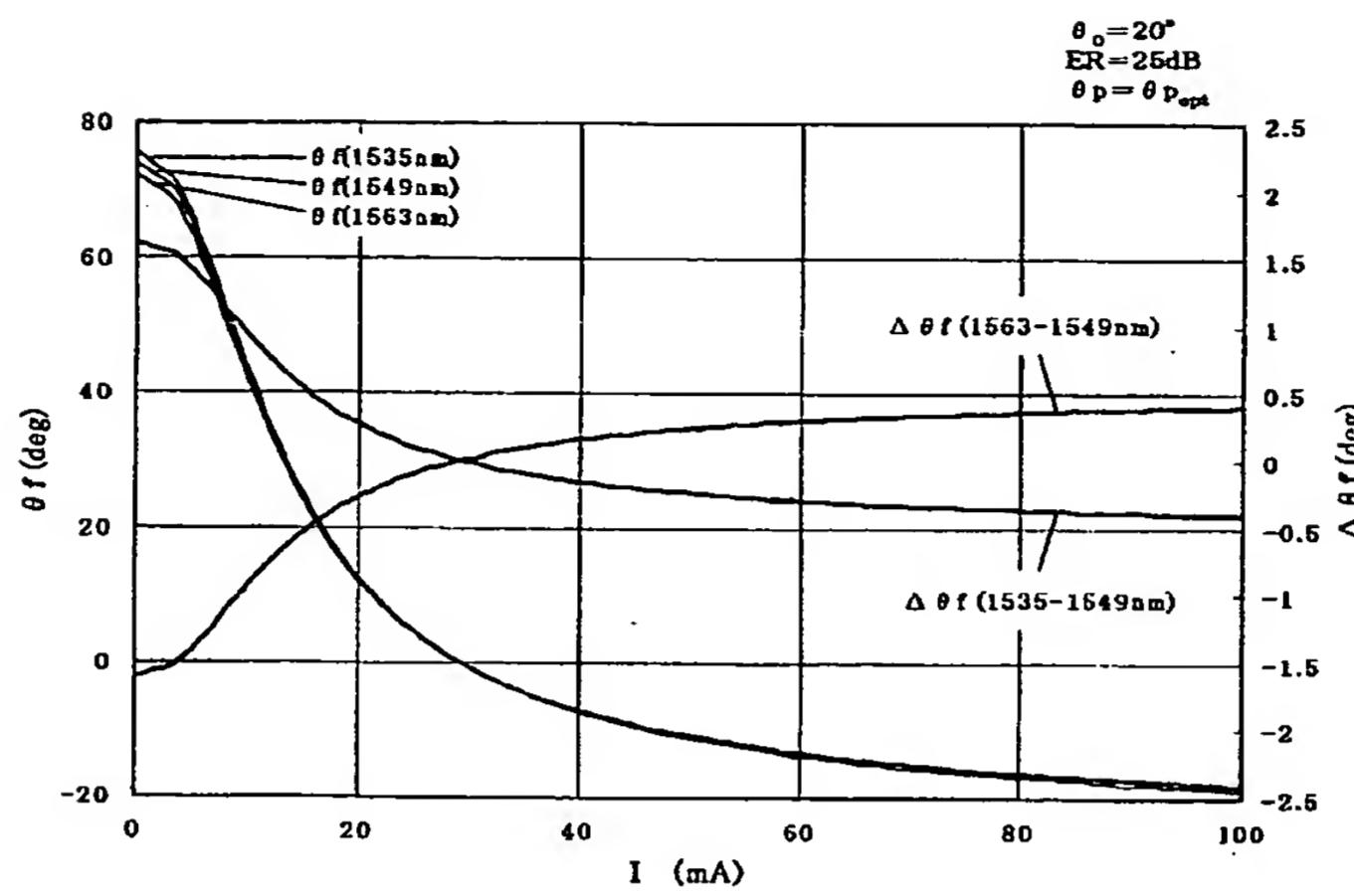
【図13】



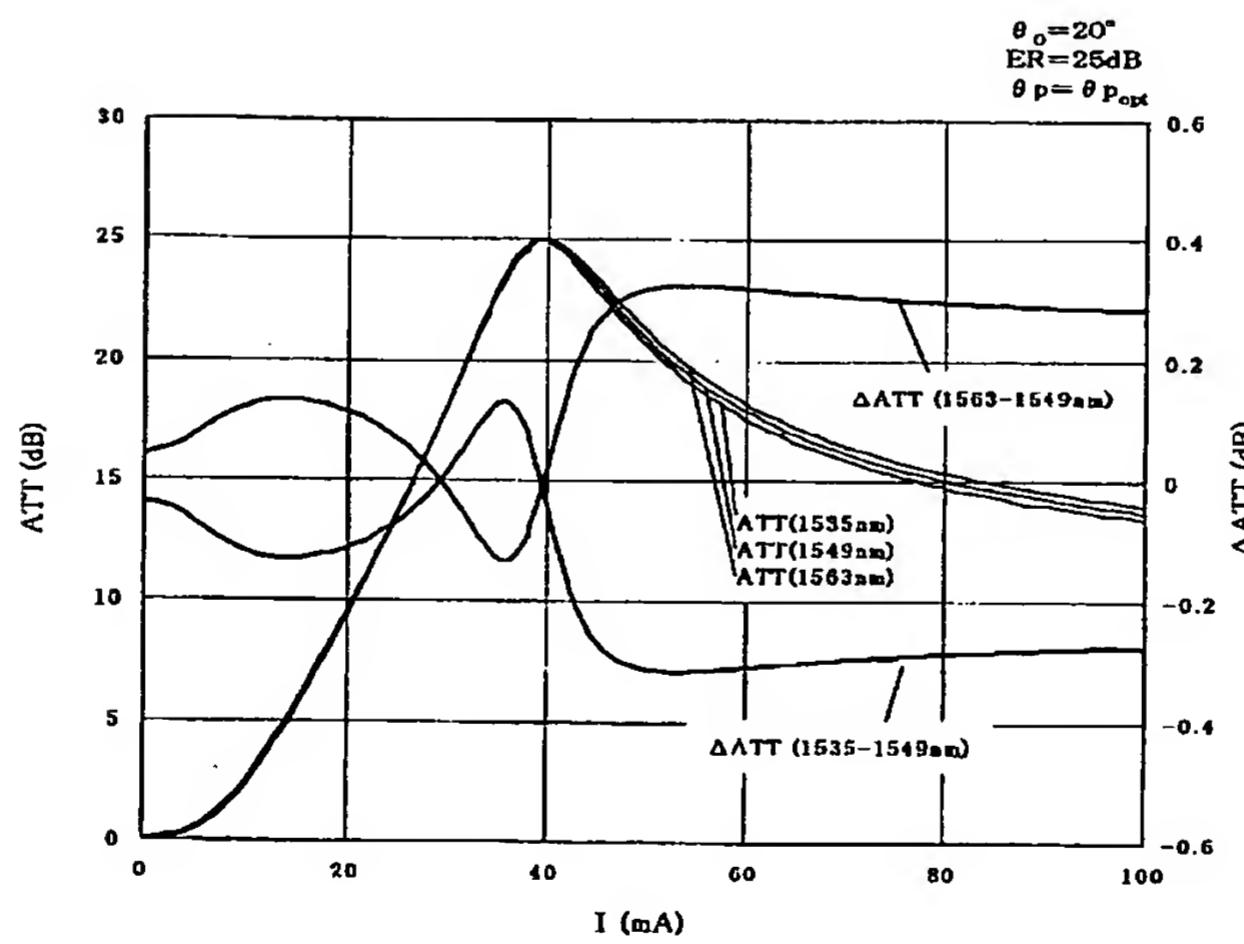
【図14】



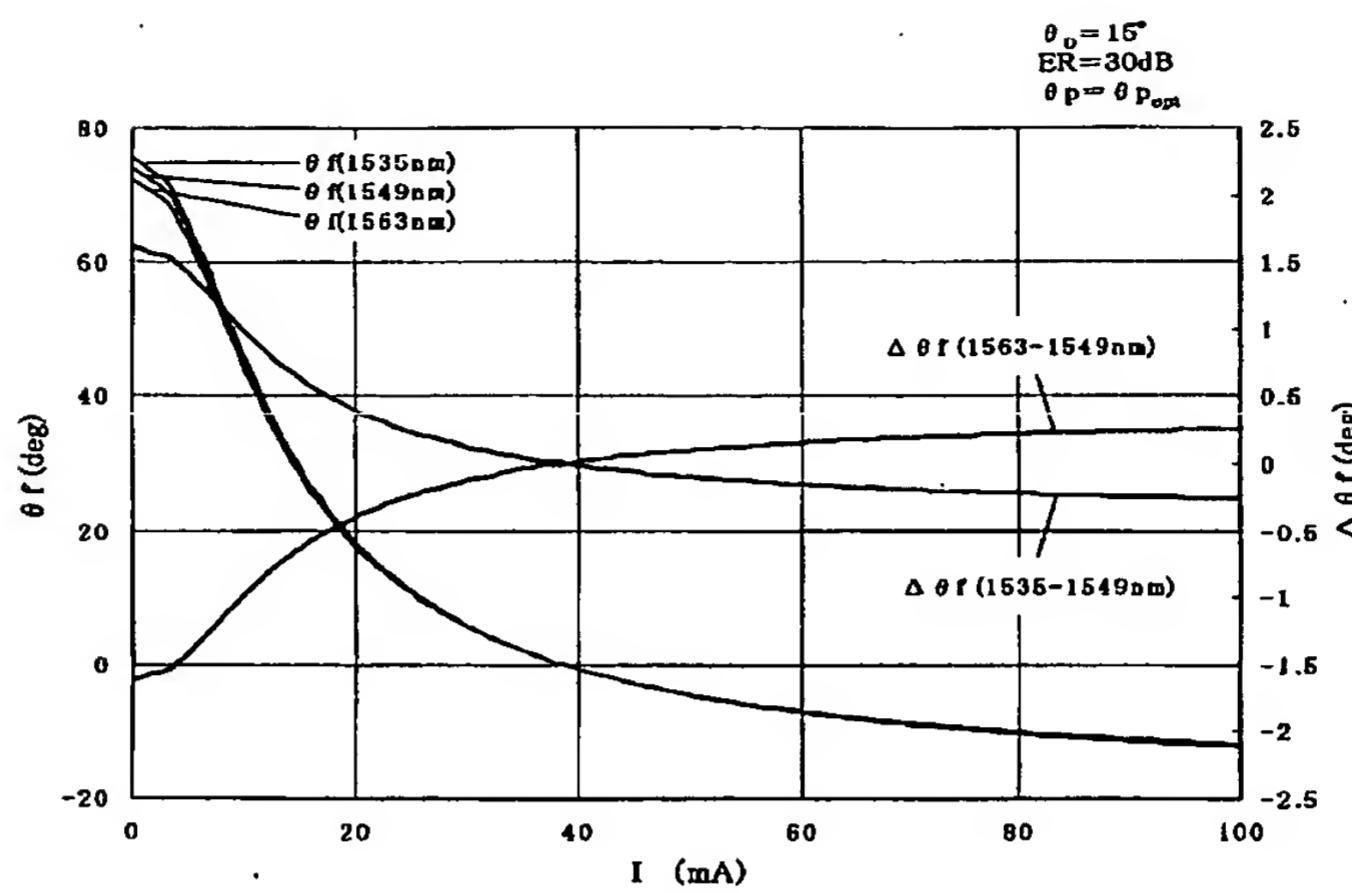
【図17】



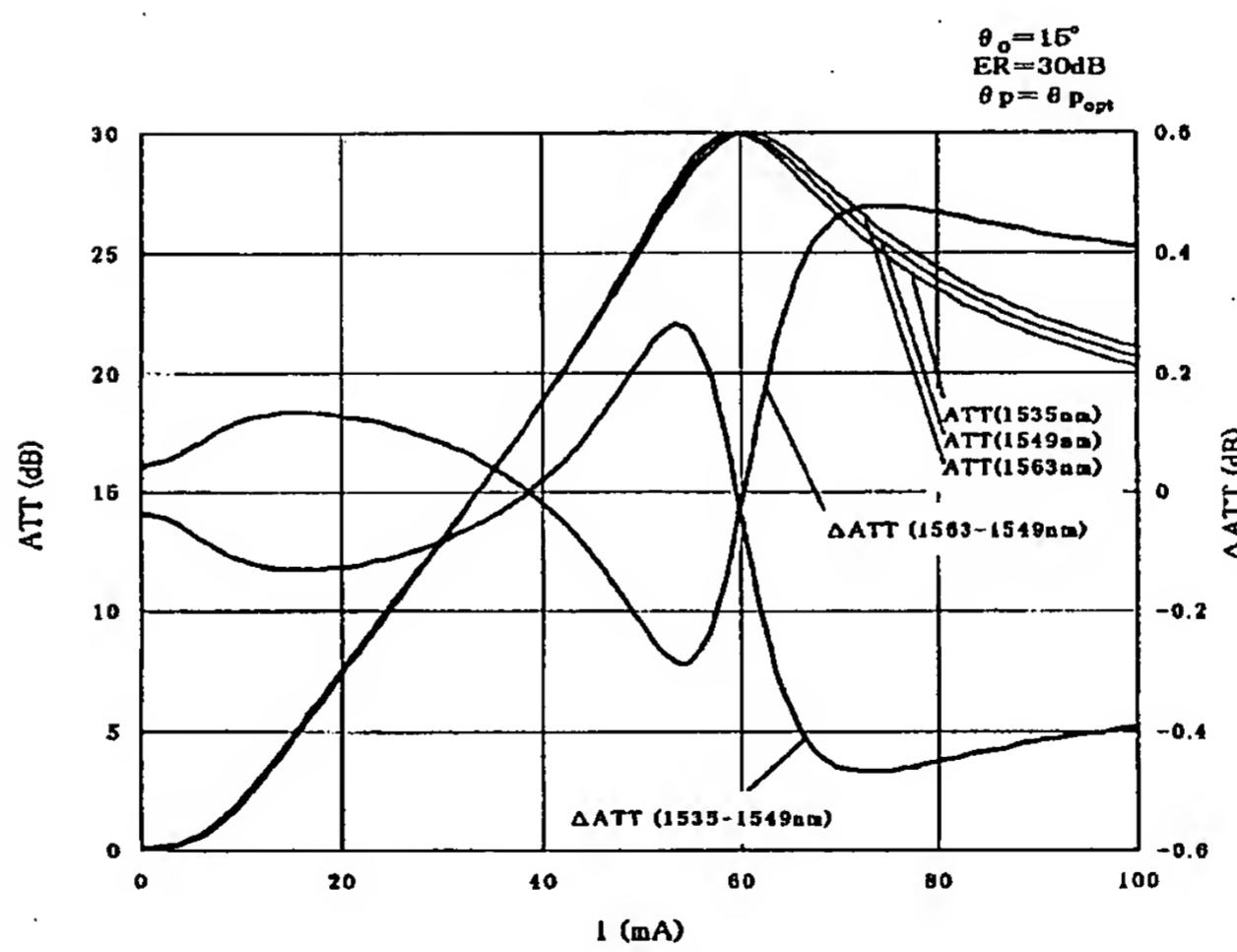
【図18】



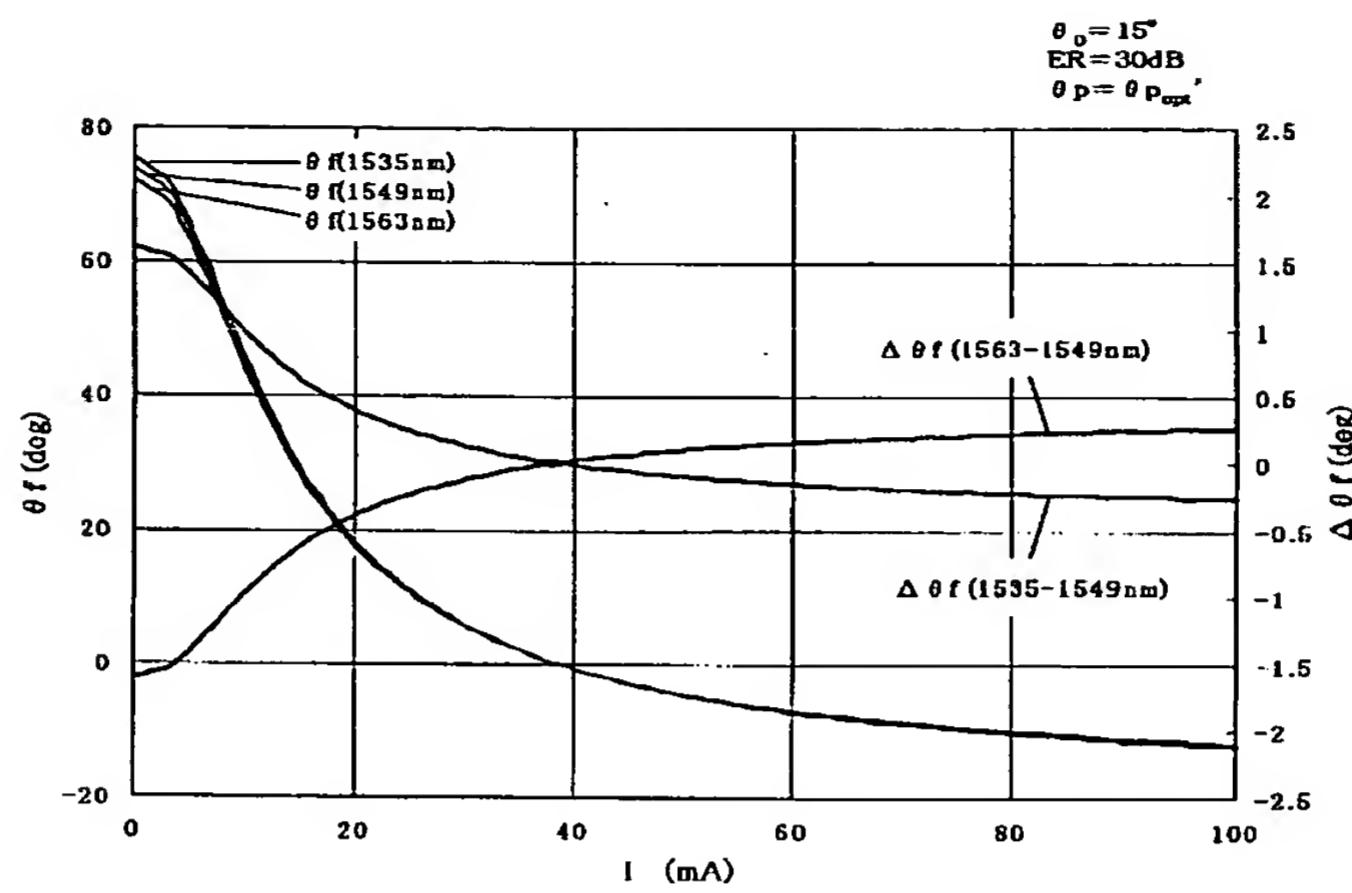
【図19】



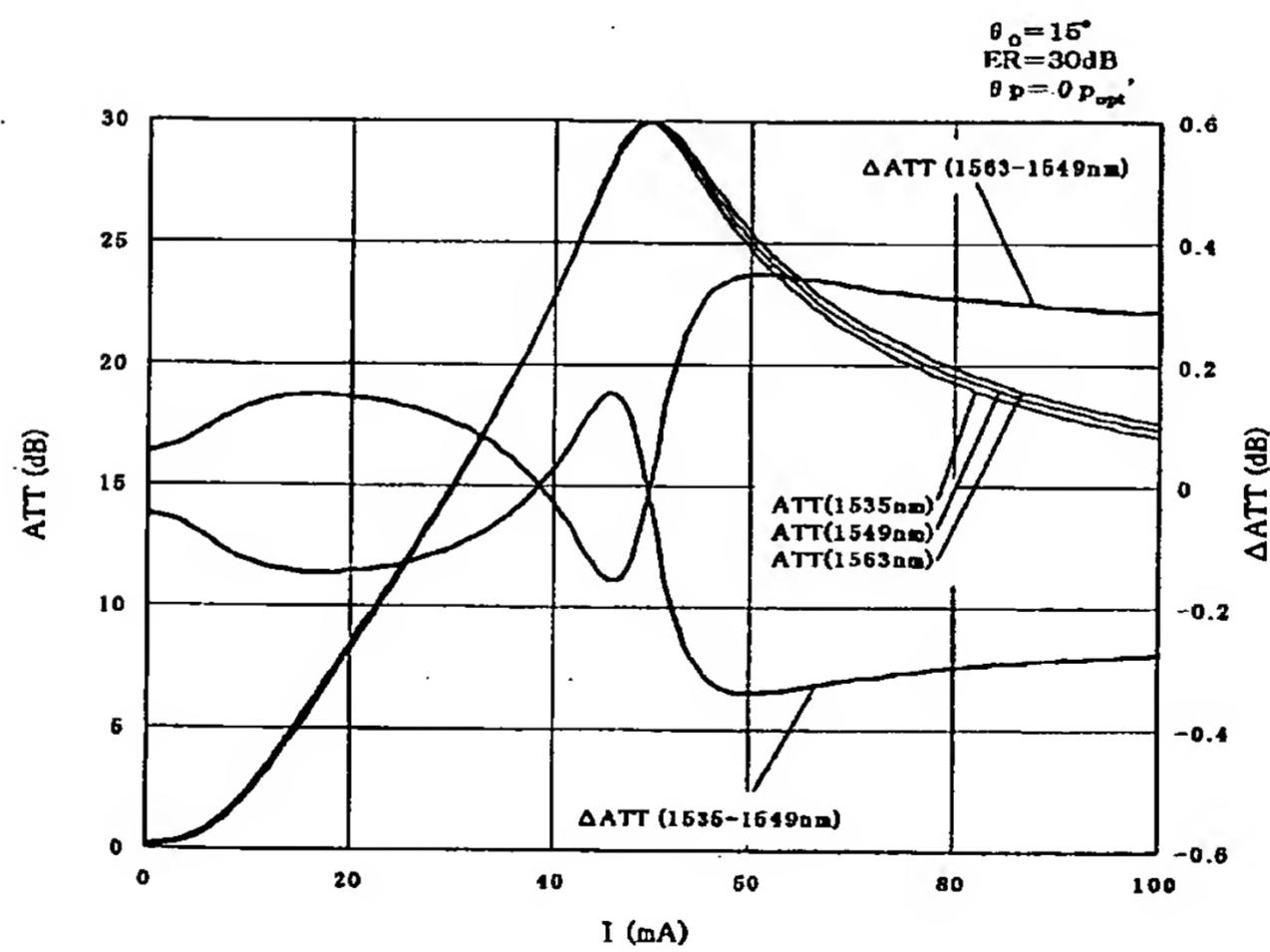
【図20】



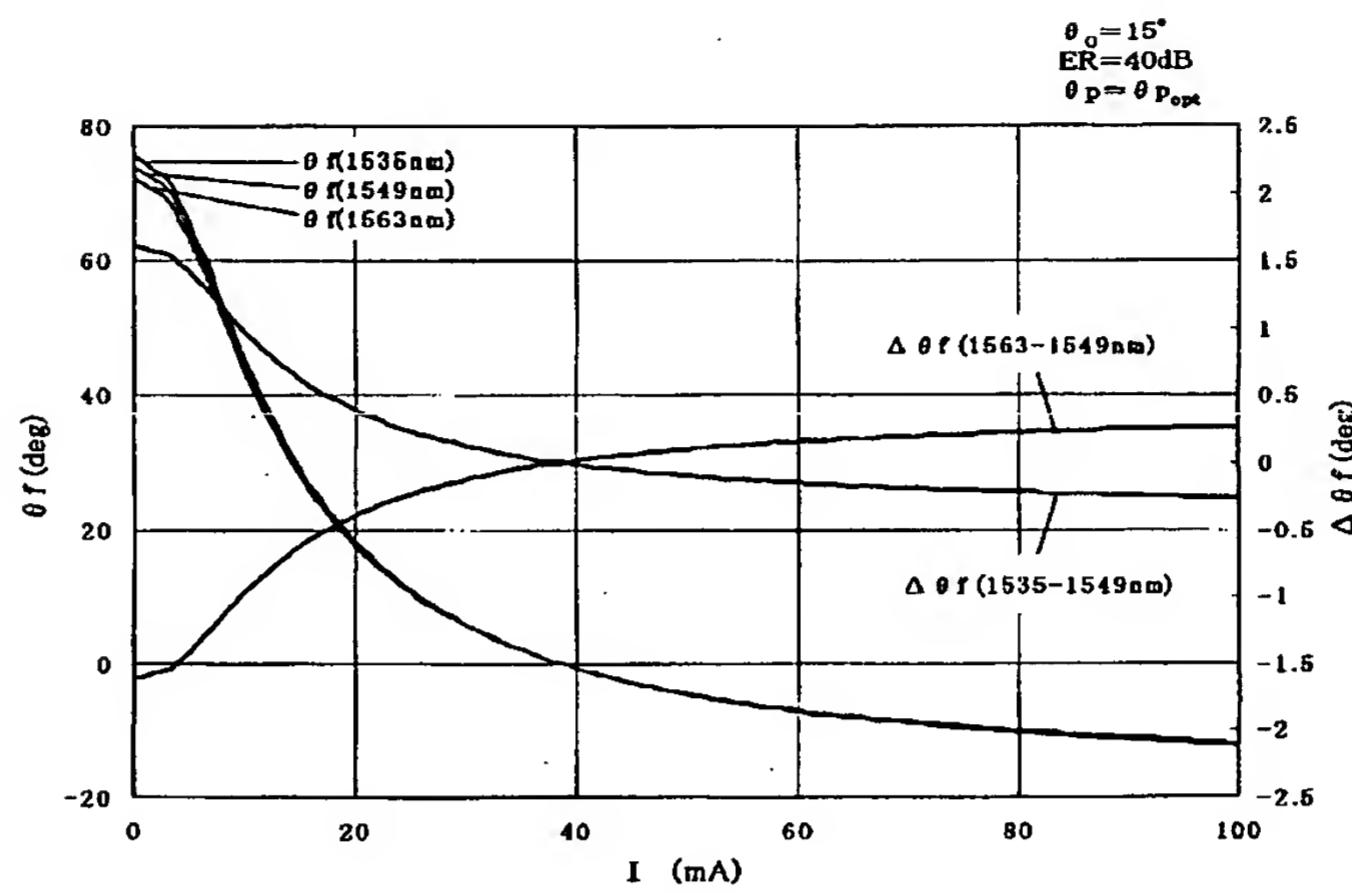
【図21】



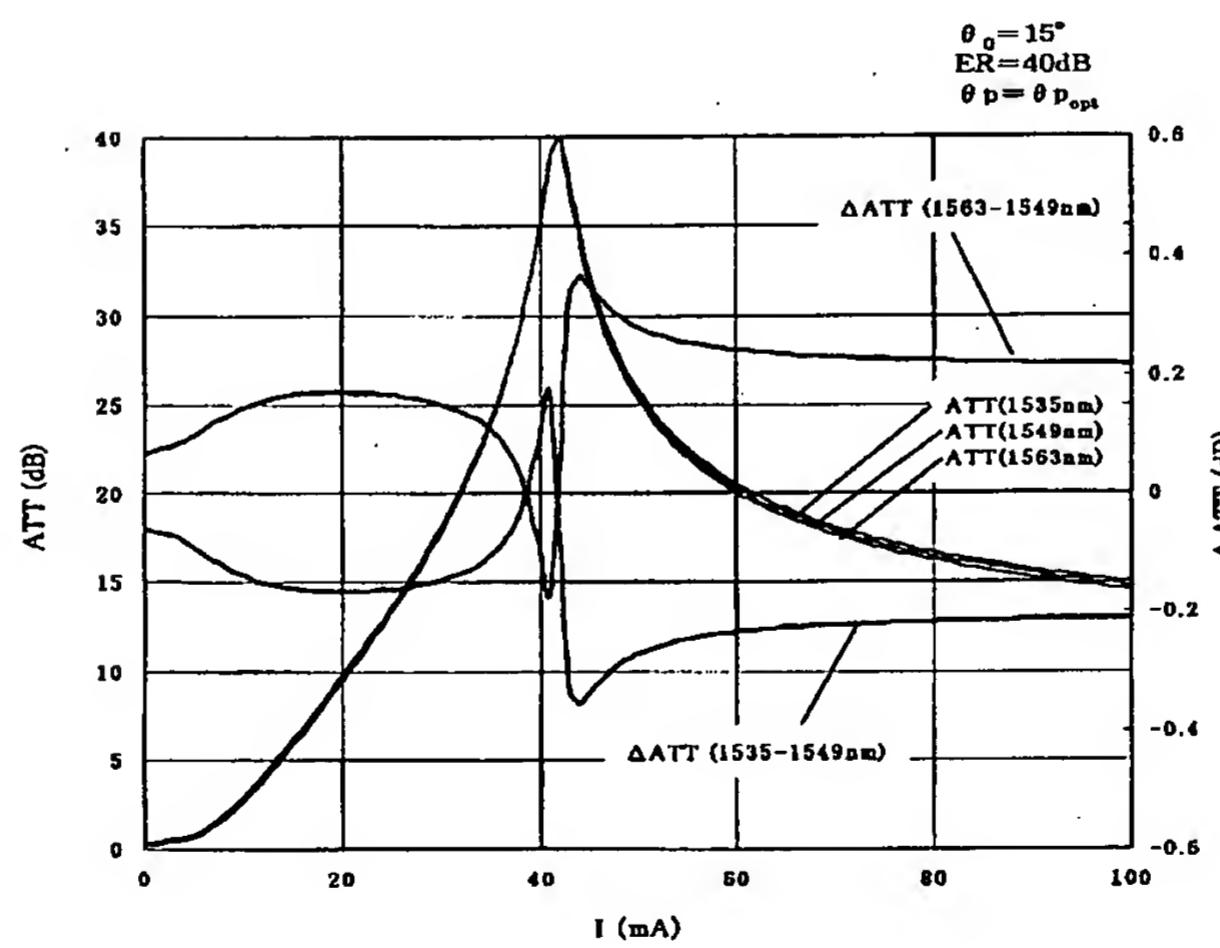
【図22】



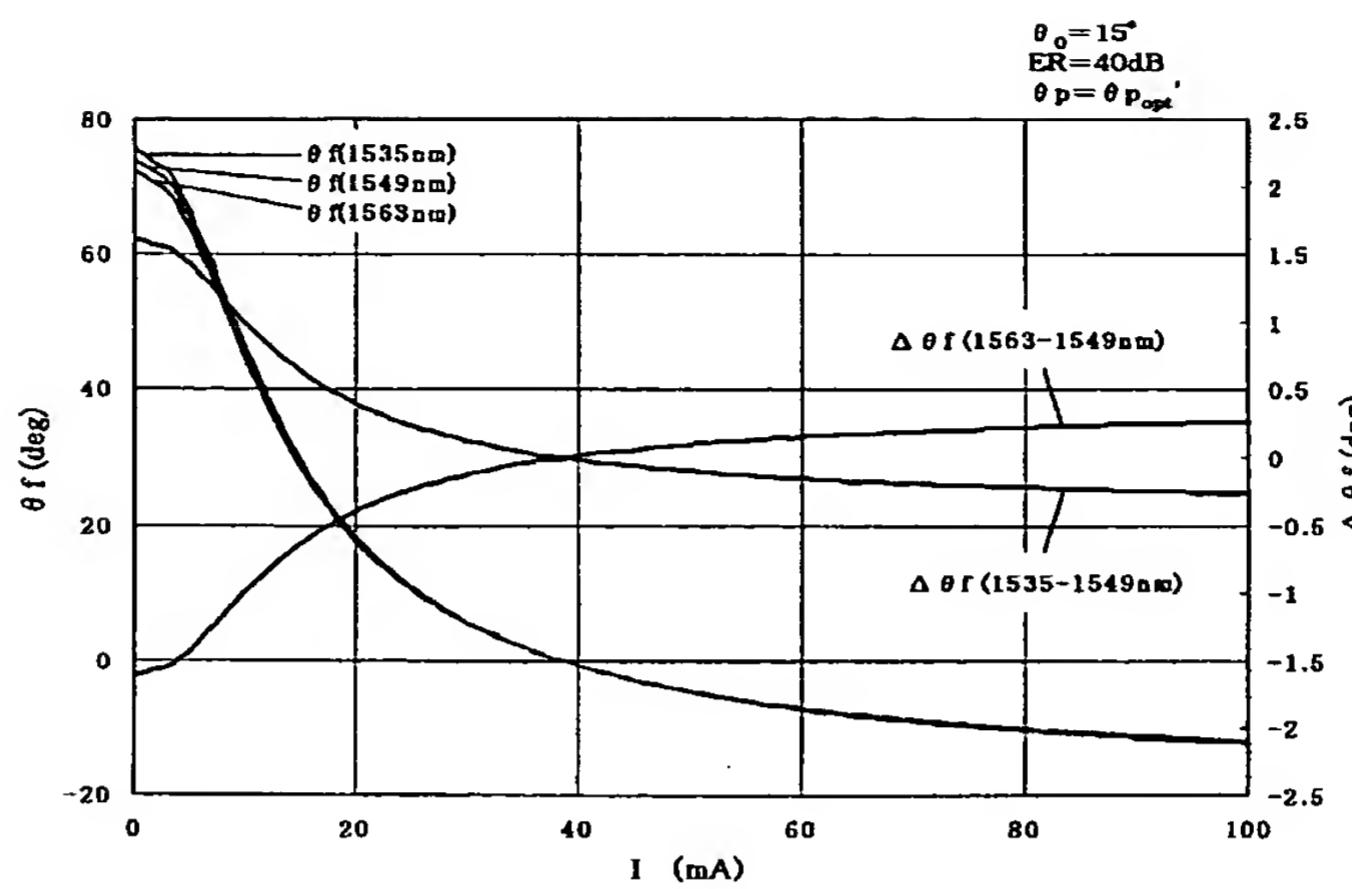
【図23】



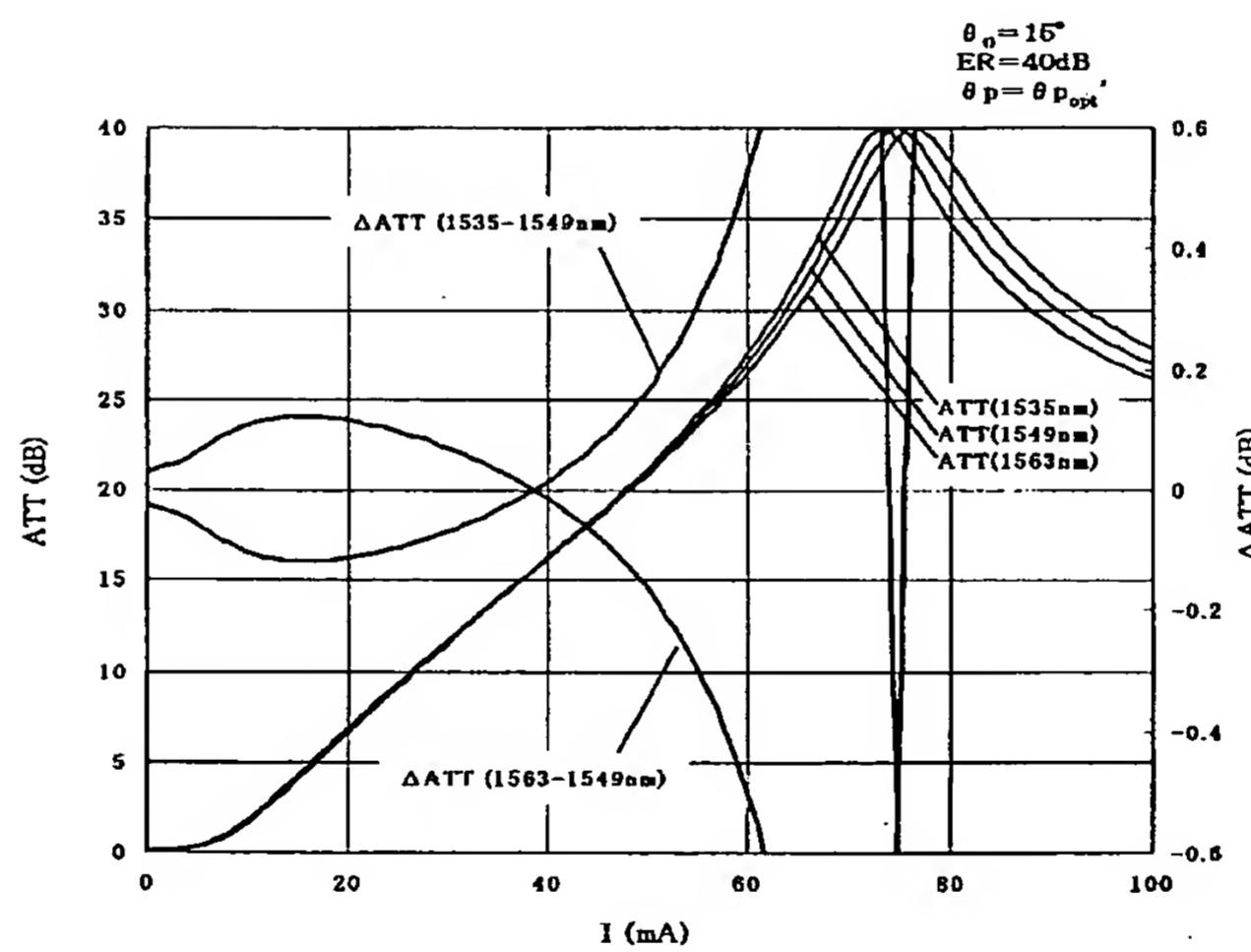
【図24】



【図25】



【図26】



フロントページの続き

(72)発明者 園田 裕彦

北海道札幌市北区北七条西四丁目3番地1  
富士通北海道ディジタル・テクノロジ株  
式会社内

F ターム(参考) 2H079 AA03 BA01 CA04 DA12 EA11  
HA11 KA05